



Universidad
Carlos III de
Madrid

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

TRABAJO DE FIN DE GRADO

DISEÑO Y ANÁLISIS TÉRMICO DE UNA PLANTA
DESALINIZADORA SOLAR DE TORRE DE CONCENTRACIÓN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y FLUIDOS

Alumno: Adrián Montañés Arribas

Tutor: Antonio Acosta Iborra

Leganés, 26 de septiembre de 2016



RESUMEN

El objetivo de este TFG es el estudio de distintas alternativas para la desalinización de agua, tanto de la propia técnica de desalinización como de la fuente de energía que se puede emplear en el proceso, y el diseño posterior de la planta elegida.

Se realizarán los cálculos térmicos de los principales subsistemas que conforman la central de desalinización. Para ello se tomarán como referencia estudios existentes de otras centrales de características similares a la que se pretende diseñar.

Los principales cálculos de resolución de ecuaciones y bucles iterativos se llevarán a cabo con el software informático Matlab R2011a. Los estados termodinámicos del ciclo Rankine de la planta se obtendrán con las tablas de propiedades tabuladas del agua, y el ciclo resultante se representará con el software Cyclepad.

Acabado el diseño y analizada la planta desde el punto de vista térmico, se presentarán las principales conclusiones extraídas, y se estudiará preliminarmente el coste aproximado de construcción de la central y el impacto ambiental que tendría su operación con energía renovable.

ABSTRACT

The main goal of this TFG is the study of different options to water desalination, including desalination techniques and energy sources, and the design of the chosen plant.

The thermal behavior of the main subsystems of the desalination plant will be calculated. For this calculation, existing works of similar plants will be taken as a reference.

The computing software Matlab R2011a will be used to solve main calculations of equations and iterative loops. The thermodynamic states of the Rankine cycle of the plant will be calculated with tabulated water properties, and the software Cyclepad will be used to depict the resulting cycle.

After designing and analyzing the plant from the thermal point of view, the main conclusions derived from the results will be presented and the approximate cost of construction and environmental impact of the plant will be preliminarily assessed.



ÍNDICE

Contenido

1: Introducción	4
1.1. Motivación y contexto.....	5
1.2. Objetivos.....	5
1.3. Fases de trabajo	6
1.4. La problemática de la escasez de agua	6
1.5. Fuentes de energía renovable para la desalinización de agua	10
1.5.1. Energía solar térmica.....	12
1.5.2. Estanques solares (SGSP)	14
1.5.3. Tecnología solar fotovoltaica.....	16
1.5.4. Energía eólica	17
1.5.5. Energía geotérmica.....	20
1.5.6. Biomasa	21
1.5.7. Energía nuclear.....	21
1.6. Sistemas de desalinización	24
1.6.1. Desalinización directa	24
1.6.2. Desalinización indirecta	25
2. Selección del tipo de central y procedimiento de cálculo.....	34
2.1. Selección del tipo de central	35
2.2. Procedimiento de cálculo	39
3. Ciclo de desalinización.....	42
3.1. Ecuaciones	43
3.2. Procedimiento de cálculo	52
4. Ciclo Rankine de vapor por unidad de masa.....	58
4.1. Ciclo Rankine.....	59
4.2. Cálculo del ciclo de vapor del proyecto	62



5.	Diseño del intercambiador sal-vapor	69
5.1.	Intercambiadores de calor	70
5.2.	Diseño del intercambiador	75
6.	Subsistema receptor	90
6.1.	Ecuaciones	91
6.2.	Procedimiento de cálculo	102
7.	Análisis de resultados	107
7.1.	Ciclo de desalinización	108
7.2.	Ciclo Rankine	113
7.3.	Intercambiador sal-vapor	114
7.4.	Subsistema receptor	118
8.	Análisis económico y de impacto ambiental	137
8.1.	Análisis económico	138
8.2.	Impacto ambiental	144
9.	Conclusiones	146
9.1.	Análisis de los principales resultados	147
9.2.	Estimación del coste del proyecto	148
9.3.	Crítica a los resultados	148
9.4.	Líneas futuras de estudio	149



1: Introducción



1.1. Motivación y contexto

La *escasez de agua dulce* se está convirtiendo en una problemática cada vez más importante en distintas zonas en el mundo, y se espera que este problema sea mayor con el paso de los años. En zonas áridas, el agua potable es muy escasa, y las poblaciones humanas establecidas dependen de la cantidad de agua que son capaces de transformar en apta para el consumo.

Para tratar de paliar esta situación se ha producido últimamente un crecimiento notable en la implantación de sistemas de desalinización de agua, debido a que en aquellas zonas donde esta presente esta escasez, se dispone de otras formas de energía renovable explotables. Además, en los países de Oriente Medio se dispone del capital necesario para el desarrollo de estas centrales, ya que es una zona en la que abundan los campos petrolíferos. Estos países se han convertido en los principales impulsores del desarrollo de esta tecnología, mientras que en otras zonas se emplean otros sistemas de menor coste que también serán analizados más adelante.

Además, España es tanto el gran pionero europeo en desalinización de agua como uno de los países que más han apostado por la energía renovable, por lo que es interesante ubicar la central en territorio peninsular.

En este trabajo se analizarán distintas alternativas de diseño para una central, y se detallará la metodología de diseño de la central escogida, y se realizarán los cálculos de la central desde el sistema de desalinización hasta los de la obtención de la energía que hace funcionar la central.

1.2. Objetivos

El principal objeto de este proyecto es detallar los pasos para el diseño de una central que funcione con energía renovable y sea capaz de desalinizar agua.

Los principales objetivos son:

- Realizar un estudio exhaustivo de las distintas técnicas de desalinización y las diferentes fuentes de energía renovable que podrían operar la central.
- Adquirir los conocimientos básicos sobre el funcionamiento de los distintos subsistemas de la central.
- Llevar a cabo un diseño lo más realista posible mediante la obtención de distintos datos a partir de centrales ya operativas. Se realizarán distintas



modificaciones y simplificaciones y se estudiará cómo pueden afectar al resultado final.

- Realizar los cálculos sobre el sistema de desalinización y los sistemas intermedios con ayuda del software informático Matlab.
- Realizar un breve análisis económico y de impacto ambiental realizando distintas simplificaciones, ya que no se trata de uno de los objetivos principales del proyecto.

Para los distintos cálculos a realizar se supondrá que la central opera **durante 12 horas al día, 365 días al año.**

1.3. Fases de trabajo

El trabajo se divide en las siguientes fases:

- ***Documentación***, acerca de proyectos y estudios similares que se han llevado a cabo en los últimos años, tanto de los distintos sistemas de obtención de energía solar como de los diferentes procedimientos para la obtención de agua potable.
- ***Obtención de las ecuaciones de los subsistemas***
- ***Fijación de parámetros de entrada y restricciones***, gracias a otros estudios similares realizados.
- ***Resolución de las ecuaciones***, con ayuda del software de cálculo Matlab, que nos permitirá variar los parámetros fijados fácilmente si fuera necesario, para lograr optimizar el proceso. También nos ayudaremos de tablas de propiedades de distintas fuentes y del software Cyclepad.
- ***Análisis de los resultados obtenidos.***
- ***Redacción de la memoria.***

1.4. La problemática de la escasez de agua

A simple vista, el problema de la escasez de agua dulce puede resultar sorprendente ya que ***el agua es uno de los recursos más abundantes en la Tierra*** ([1]), ocupando tres cuartas partes de la superficie terrestre. Sin embargo, el 97% de esta agua se trata de agua salada, y solo el 3% (unos 36 millones de kilómetros cúbicos) es agua dulce de los polos, subterránea y de lagos y ríos, que satisfacen las necesidades humanas y de la fauna de la zona. Además, dentro de este 3%, el 70% se encuentra permanentemente congelada en glaciares, y el 30%

del agua subterránea se encuentra a una gran profundidad, lo que dificulta su extracción. Esta situación puede observarse en la figura 1.

En zonas como Oriente Medio o el Norte de África (región que a partir de ahora será nombrada con el acrónimo MENA), **la necesidad de agua dulce se encuentra permanentemente en aumento**, debido al continuo crecimiento demográfico y económico de la región. La sobreexplotación de las aguas subterráneas ha resultado una medida poco recomendable e insuficiente. [2]

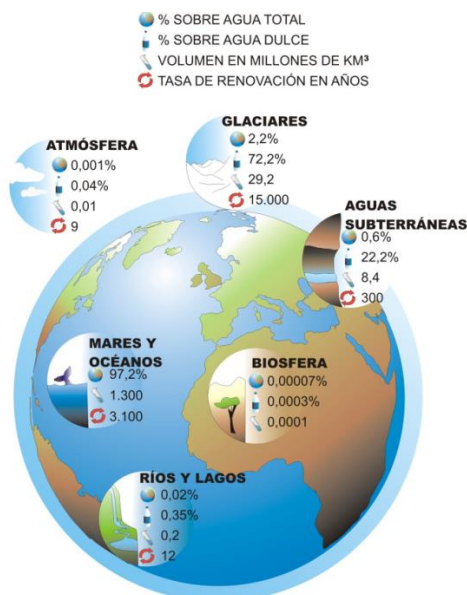


Figura 1: Distribución del agua en la Tierra [3]

Además, la humanidad se enfrenta a otros problemas como la contaminación de ríos y lagos por residuos industriales, así como la desigual distribución del agua dulce disponible. Por ejemplo, Canadá dispone de una décima parte del agua dulce mundial, pero de menos de un 1% de la población.

La UNEP (United Nations Environment Programme) estimó en el año 2008 que había unos 200,000 km³ utilizables para toda la vida en la tierra. Sin embargo, la demanda se está incrementando debido a las necesidades agrícolas e industriales, y se calcula que continuará esta tendencia hasta que en **el año 2025 varios países tendrán que enfrentarse a una crisis del agua severa**, y en el año 2030 solo el 60% de la demanda global de agua podrá cubrirse. [4]

Por esta creciente demanda de agua, hace tiempo que surgió la idea de aprovechar el agua de los mares y océanos para cubrir las necesidades humanas, ya que se trata de una fuente de agua ***prácticamente inagotable***.

El problema es que esta agua presenta una ***alta salinidad***. Según la OMS (Organización Mundial de la Salud), el límite de salinidad permitido para que el agua sea apta para el consumo humano es de 500 ppm (mg de sal presentes en la masa de agua), y para usos especiales de 1000 ppm. La mayoría del agua disponible en la Tierra tiene una salinidad de 10.000 ppm, y el agua de mar en condiciones normales tiene una salinidad de 35.000-45.000 ppm. El consumo de agua con tan alto contenido en sal puede provocar mal sabor y problemas estomacales. [1]

Una de las soluciones más obvias a este problema es tratar de reducir la concentración de sal en el agua, convirtiéndola en apta para el consumo. La cifra de centrales operando con este objetivo ascendía a más de 18000 en junio de 2015 según la Asociación Internacional de Desalinización (IDA).

Sin embargo, existen regiones donde a la escasez de agua se une ***la escasez de recursos económicos para el desarrollo de estas instalaciones***, que tienen un gran coste en infraestructura. Estas regiones pueden observarse en la figura 2. En estos lugares se utilizan sistemas mucho más sencillos y baratos, pero cuya eficiencia es mucho menor y no consigue obtener la cantidad de agua necesaria.

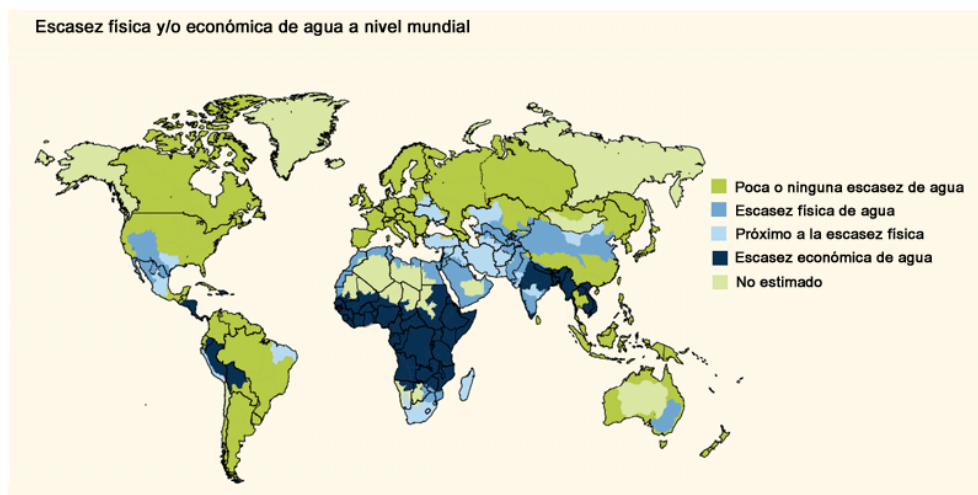


Figura 2: Escasez física y/o económica a nivel mundial [5]

Cada vez es mayor el número de centrales operativas. La capacidad de sistemas de desalinización de agua en el año 2000 era de 22 millones de m^3/d ([1]). El crecimiento experimentado en los últimos años se muestra en los gráficos 1 y 2.

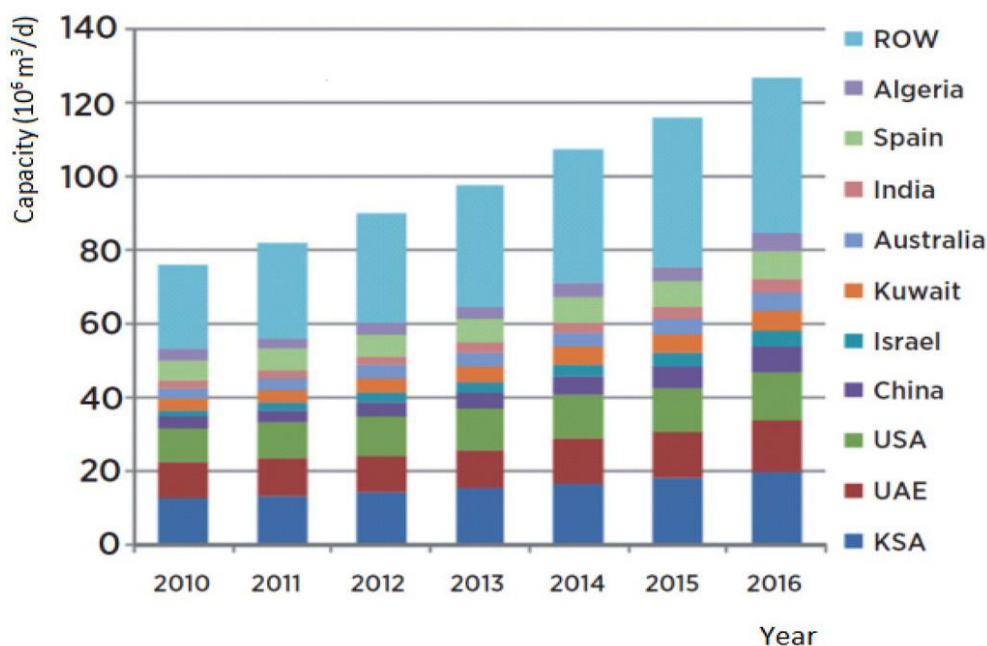


Gráfico 1: Capacidad en m^3/d por países. Adaptado de [6]

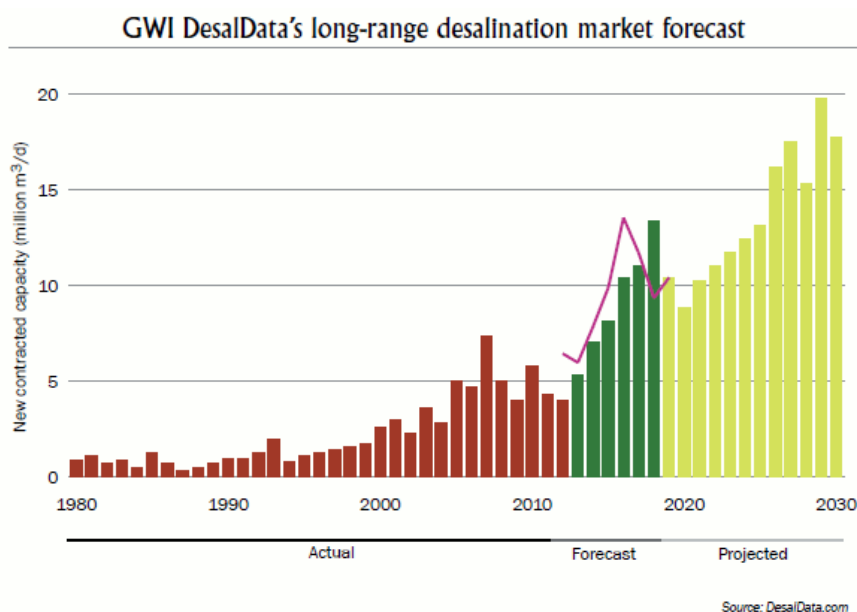


Gráfico 2: Incremento de la capacidad mundial en m^3/d [7]

En el gráfico 3 puede observarse el incremento de la inversión en sistemas de desalinización en los principales impulsores de este tipo de tecnología.

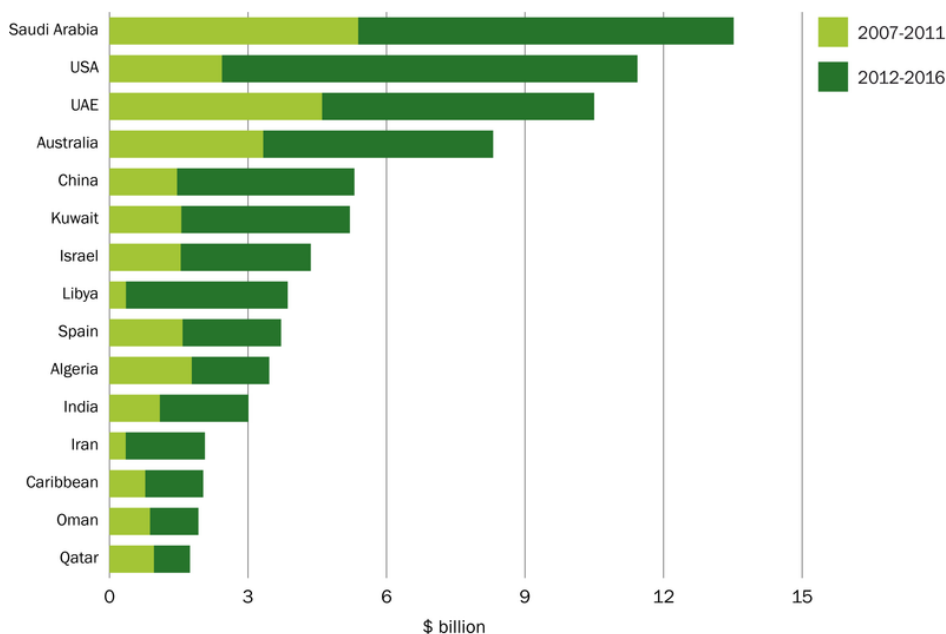


Gráfico 3: Inversión en sistemas de desalinización (Global Water Intelligence) [8]

1.5. Fuentes de energía renovable para la desalinización de agua

El ***gran problema*** de los procesos de desalinización es ***la gran cantidad de energía necesaria para separar las sales del agua***. Si se utilizaran fuentes de energía convencionales, sería necesaria la combustión de grandes cantidades de combustibles fósiles (130 millones de toneladas de petróleo por año estimadas para la producción de unos 13 millones de m³/día [9]), lo que tendría un impacto medioambiental y económico muy negativo debido al incremento de las emisiones de CO₂ a la atmósfera y a la poca fiabilidad del suministro de agua y energía [10].

El dióxido de carbono es el gas más importante del efecto invernadero. Sus emisiones a la atmósfera se han incrementado un 80% entre 1970 y 2004 según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio (IPCC) [11]. Es por ello que los procesos de destilación van estrechamente ligados a las fuentes de energía renovable, debido a la insostenibilidad de llevar a cabo el proceso con combustibles fósiles. En el gráfico 4 se muestra el incremento de las ppm de CO₂ en

la atmósfera en el último milenio, lo que hace hincapié en la necesidad de disminuir rápidamente las emisiones.

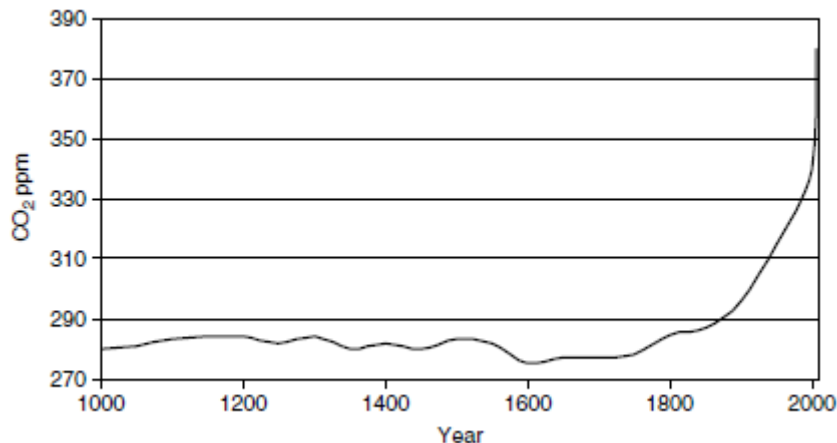


Gráfico 4: Evolución de las emisiones de CO₂ en el milenio [1]

Otras ventajas del uso de energía renovable son [1]:

- **Crecimiento económico y social**, con la creación de empleo, sobre todo en zonas rurales, donde las oportunidades de crecimiento económico son reducidas.
- **Reducción de la polución del aire**, al no producirse ninguna de las emisiones asociadas con la contaminación del aire urbano, lo que supone un ahorro en desarrollo de sistemas de control.
- **Diversidad en la oferta energética**, de manera que el consumidor tiene una gran variedad donde elegir y es menos vulnerable a la manipulación monopolista o a inesperadas interrupciones del suministro.
- **El precio de los combustibles fósiles está en aumento**, y estos son un recurso limitado.

Se realizará a continuación un estudio de los distintos tipos de energía renovable que pueden utilizarse para llevar a cabo el proceso de destilación, con el objetivo de encontrar aquel que mejor se ajuste a nuestra central.

1.5.1. Energía solar térmica

La energía solar tiene un gran potencial y una amplia gama de aplicaciones debido a su naturaleza no contaminante, abundancia, y el hecho de ser una ***fente inagotable de energía***.

La energía solar térmica o termosolar consiste en la concentración de energía solar (CSP) para obtener energía térmica. Esta energía se empleará en la producción de vapor para operar una turbina, que generará electricidad.

Se trata de una de las aplicaciones más prometedoras de energía renovable para destilación de agua [1], debido a su sencillo acoplamiento, utilizando el vapor generado para operar un sistema de desalinización indirecta. Otro de sus atractivos es la capacidad de hibridación, es decir, la posibilidad de obtener parte de la energía necesaria a partir de otra fuente de energía renovable, como el gas o la biomasa, disminuyendo la dependencia del proceso con la energía suministrada por el Sol. También podrían utilizarse combustibles fósiles, en cuyo caso la planta no sería totalmente renovable, pero aun así sería ventajoso ya que sería totalmente gestionable y estaría preparada para periodos de déficit de energía.

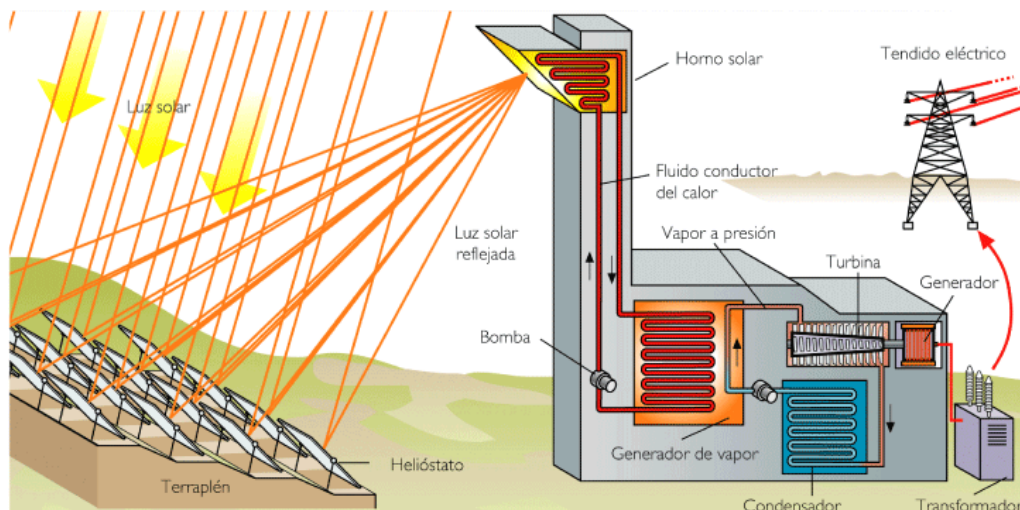


Figura 3: Central termosolar de torre de concentración [12].

Las plantas CSP han ganado en interés recientemente, sobre todo las que utilizan captadores cilindro-parabólico (PTC) y las torres solares (SPT), como la mostrada en la figura 3. Estas últimas han ido ocupando progresivamente una posición privilegiada en el mercado, debido a su mayor eficiencia, los menores costes operativos y las facilidades que presentan para ampliarse. La capacidad de esta

tecnología para operar a gran escala ha quedado demostrada en Torresol, dentro del proyecto Gemasolar, en Sevilla. Esta central tiene una potencia de 19.9 MW_e, y es capaz de producir unos 100GWh/año. Esta tecnología ha sido desarrollada principalmente en España y Estados Unidos como se refleja en el gráfico 5, gracias a los esfuerzos de la Plataforma Solar de Almería y de los Sandia National Laboratories, aunque recientemente se está experimentando un gran crecimiento en la región MENA [13] y [14].

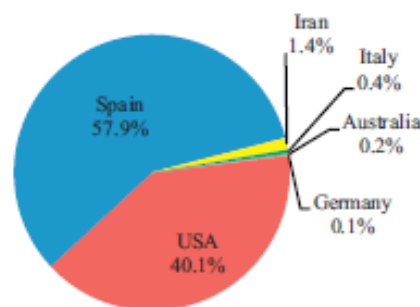


Gráfico 5: Energía CSP instalada [13]

Una de las principales ventajas de la energía termosolar es la capacidad de almacenamiento de la energía sobrante, lo que resulta de gran utilidad debido a que la principal desventaja de la energía solar es la **variación diaria y mensual del flujo de radiación**. Esta energía puede almacenarse por distintos métodos, como por bombeo, utilizando baterías o mediante supercondensadores, pero el método más empleado es el almacenamiento de energía térmica (TES), donde la energía térmica sobrante se almacena en dos tanques de sales fundidas, el de temperatura de alta y el de temperatura de baja. Cuando se necesite, la energía térmica puede transferirse del tanque caliente al fluido de trabajo.

El almacenamiento de energía térmica (TES) es un componente clave en las CSP, ya que la experiencia ha demostrado que de otra manera estas centrales no pueden operar correctamente en días nublados o suministrar energía durante la noche. Con respecto a otros métodos de almacenamiento de energía, el TES tiene la ventaja de tener **menores costes de capital y grandes eficiencias de operación** [15].

Pero la mayor ventaja del TES es que permite cubrir la demanda durante las horas del día con menor radiación solar, y estabiliza la generación de energía, reduciendo las fluctuaciones que pueden generar los cambios meteorológicos, lo que ha producido un aumento de la apuesta por las centrales CSP+TES [16].



Si continúan con su crecimiento y desarrollo, se estima que las centrales CSP tendrán la capacidad de generar el 7% de la electricidad necesaria a nivel mundial en 2030, y el 25% en 2050 [17].

1.5.2. Estanques solares (SGSP)

Un SGSP (Salinity-Gradient Solar Pond) es una piscina de agua salada, donde la concentración de las sales en el agua aumenta con la profundidad. Esta profundidad suele ser de 1-2 metros [1]. El agua es más densa cuanto mayor es su concentración en sales, y se aloja en el fondo del estanque cuando está cerca del límite de saturación. El gradiente de presiones impide la convección libre, y el calor de la radiación solar queda atrapado en las capas de mayor concentración. Pueden almacenar calor a largo plazo, y operan entre 50 y 90°C [1] y [18].

Los SGSPs suponen una opción muy conveniente y barata para el almacenamiento de calor, y pueden producir un caudal de agua constante, ya que el calor almacenado permite destilar agua durante días nublados o por la noche. Al trabajar durante 24 horas, su tamaño puede ser de la mitad de tamaño que cualquier otro sistema alternativo de destilación. Su eficiencia difícilmente supera el 17%, siendo ésta una de sus principales limitaciones [18].

La salmuera sobrante es uno de los principales problemas de los sistemas de desalinización. En los SGSPs en cambio, esta salmuera (en inglés *brine*) sirve como base del estanque solar, por lo que no tendrá ningún impacto ambiental.

Uno de los grandes centros de investigación de los SGSP se encuentra en la Universidad de El Paso, en Texas (figura 4).

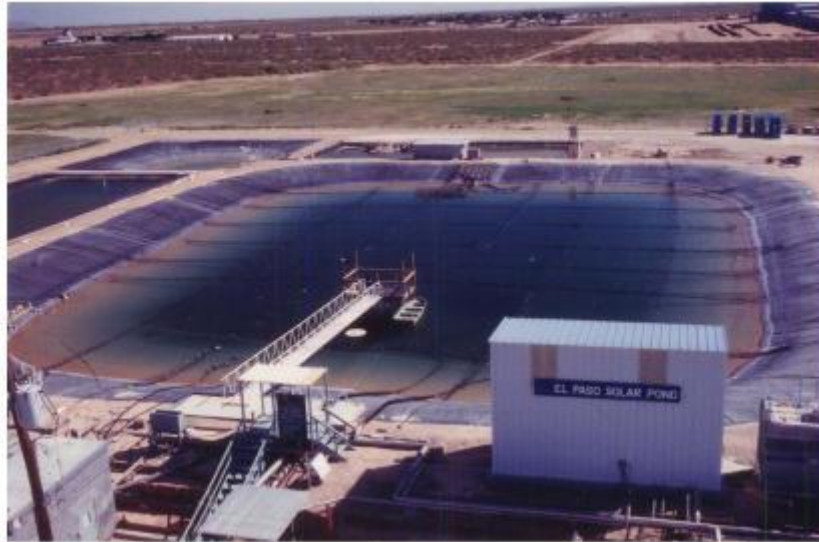


Figura 4: Estanque solar en El Paso, Texas [19]

Una SGSP consta de tres zonas, como se muestra en la figura 5:

- **Upper Convecting Zone (UCZ)**, o zona convectiva superior, de unos 30 centímetros de profundidad, donde la salinidad es baja y su valor es constante. La UCZ mantiene el gradiente salino de la zona no convectiva, y dado que en ella existen convección y evaporación, debe restituirse continuamente.
- **Non-convecting Zone (NCZ)**, o zona no convectiva, es la capa situada en el centro, y en ella **existen gradientes tanto de salinidad como de temperatura**. El gradiente de concentración hace que la NCZ actúe como aislante térmico. El gradiente de temperatura se forma debido a la absorción de radiación solar en la capa del fondo del estanque.
- **Lower convecting zone (LCZ)**, o zona convectiva inferior, es la zona situada en la parte más profunda del estanque, y en ella encontramos una salinidad muy elevada y de un valor que podemos suponer constante (unas 200.000 ppm) a alta temperatura. En la LCZ es donde se almacena el calor. Cuanto más profunda sea esta zona, mayor será la capacidad y las variaciones de temperatura a lo largo del año serán muy pequeñas, pero también incrementará la inversión inicial necesaria así como el tiempo necesario para que el SGSP empiece a funcionar. [1], [20].

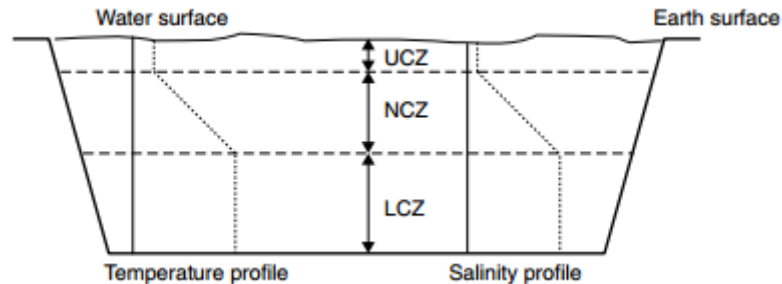


Figura 5: Esquema de un SGSP [1]

1.5.3. Tecnología solar fotovoltaica

Los módulos fotovoltaicos son instrumentos que convierten la radiación solar en energía eléctrica de manera directa, sin necesidad de otros sistemas intermedios [1]. Estos módulos tienen una larga vida de uso y requieren poco mantenimiento, además de no generar emisiones. Su funcionamiento es bastante silencioso. Los sistemas fotovoltaicos son de tamaño muy variable, y su disposición modular hace que pueda ampliarse el número de colectores con gran facilidad. Pueden generar electricidad en un amplio rango de potencias.

Una célula fotovoltaica consiste en dos delgadas láminas de material semiconductor, como silicón y compuestos de sulfuro de cadmio (CdS), sulfuro cuproso (Cu_2S) y arseniuro de galio (GaAs). Cuando este material se expone a la radiación solar se generan cargas eléctricas, de manera que se produce una diferencia de potencial entre las láminas. Esta diferencia de potencial puede aprovecharse conectando un cable metálico, que permite el flujo de electrones, es decir, el paso de la corriente eléctrica. Una sola célula produce muy poca electricidad, por lo que suelen formarse asociaciones de muchas células o *paneles fotovoltaicos*. Estos paneles se asocian formando módulos fotovoltaicos. La corriente continua obtenida ha de ser convertida en corriente alterna mediante el uso de convertidores.

Hace unos 50 años, la fabricación de un panel fotovoltaico requería más energía que la que el propio panel era capaz de fabricar durante su vida de funcionamiento. Sin embargo, en las últimas décadas se han realizado importantes mejoras en el rendimiento de los paneles, de manera que el periodo de amortización se ha reducido a 3-5 años en función de la radiación disponible en su emplazamiento, y se espera que para el año 2020 el coste de la energía fotovoltaica se reduzca a 1\$/W.

La contribución de la tecnología fotovoltaica en la generación de energía eléctrica se encuentra en continuo crecimiento. Representa **el tercer mayor recurso de energía renovable del planeta**, después del agua y el viento, y es utilizada en la actualidad en más de 100 países. Es además el que tiene mayor densidad energética, con un valor medio estimado de unos 170W/m^2 , y sus costes de mantenimiento y operacionales son los más bajos [21]. En el gráfico 6 se puede ver el crecimiento de esta energía comparada con otras de las principales fuentes de energía en el año 2014.

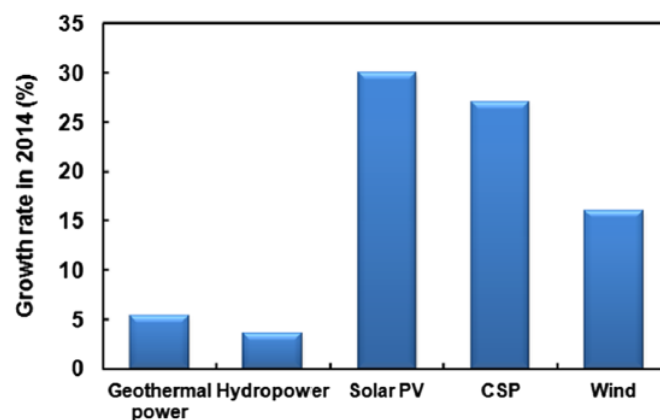


Gráfico 6: Crecimiento de energías renovables en 2014 [22]

Sin embargo, a pesar de todos los avances realizados en los últimos años, la energía fotovoltaica cuenta con las siguientes desventajas: [23]

- Eficiencia limitada
- Elevado coste de instalación por unidad de área
- Sistema de almacenamiento no rentable económicamente

Por tanto nuevas mejoras han de ser introducidas para que la tecnología fotovoltaica se mantenga como la **energía renovable de crecimiento más rápido**.

1.5.4. Energía eólica

El viento es generado por las diferencias de presión atmosféricas, impulsadas por la energía solar. De los 175.000 TW de energía solar que llegan a la Tierra, alrededor de 1200 TW se emplean en la regulación del sistema de presiones. Esta energía genera un depósito de energía cinética de unos 750 EJ ($750 \cdot 10^{18} \text{ J}$) con un tiempo de renovación de 7,4 días. Este proceso tiene lugar mayormente en las capas más externas de la atmósfera, por lo que se estima que tan solo el 4,6% de

esta energía puede ser aprovechada, lo que significa que el potencial eólico mundial es del orden de 55 TW, por lo que *teóricamente*, la energía eólica podría abastecer la demanda eléctrica mundial [1].

La energía eólica ha experimentado un gran desarrollo en los últimos años (gráfico 7), y en muchos países esta energía ya es capaz de competir con los combustibles fósiles y la energía nuclear (gráfico 8). Este crecimiento al principio fue facilitado por incentivos y subsidios en países desarrollados, y continuó debido a las mejoras en la tecnología, la reducción de costes y a notables mejoras en la estimación del potencial de energía eólica [24].

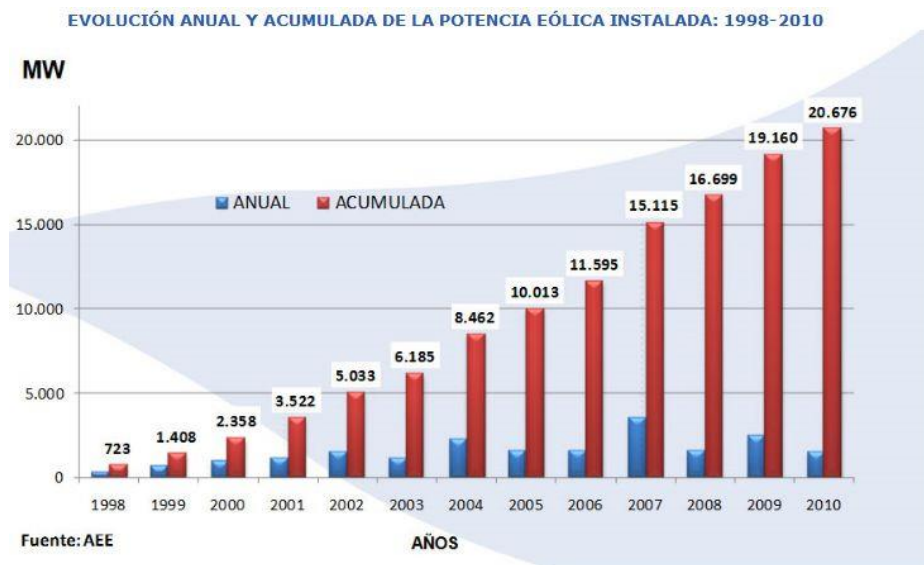


Gráfico 7: Análisis del crecimiento de la energía eólica por la Asociación Empresarial Eólica [25]

Sin embargo, la instalación de parques eólicos se ha visto frenada en la última década por el requerimiento de grandes terrenos y el rechazo de sectores de la población, impacto visual, interferencias electromagnéticas y problemas de impacto sobre la fauna y los hábitats naturales [1].

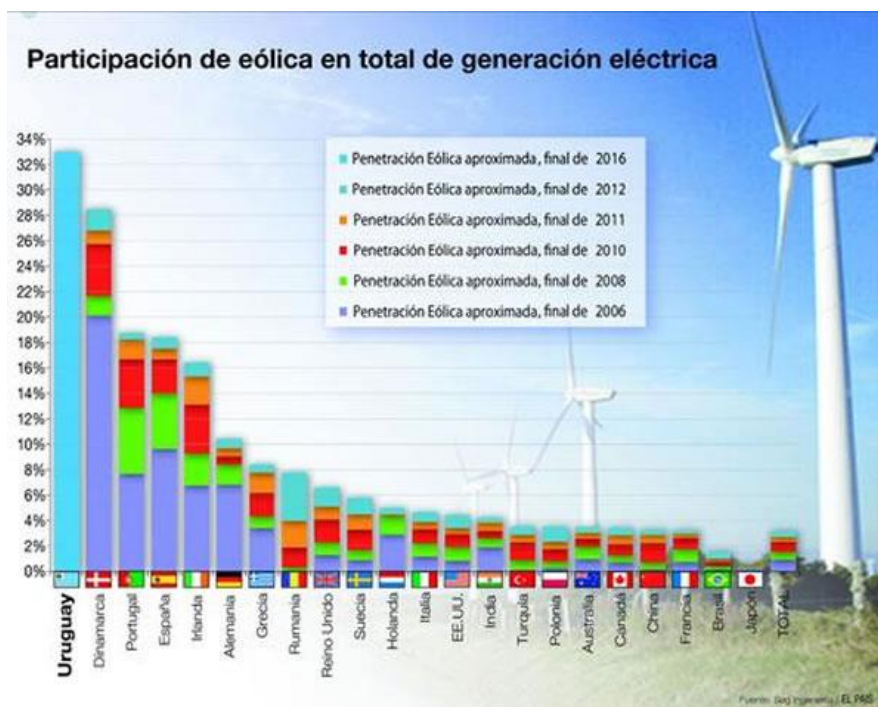


Gráfico 8: Participación eólica en el total de generación eléctrica en la última década [26]

Otro de los problemas asociados a la energía eólica es la impredecibilidad del viento, por lo que una alternativa interesante pueden ser los sistemas híbridos de energía eólica con energía solar fotovoltaica. Estos sistemas tienen su base en que los períodos de menor radiación solar suelen coincidir con los de mayor fuerza del viento, y viceversa. Esta tecnología se encuentra en fase experimental, y en 1980 el Cadarache Centre in France diseño una unidad piloto que fue instalada en Borj-Cedria, en Túnez.

Túnez está situado en la costa mediterránea del norte de África, con una superficie de 163610 km². Está rodeada por Argelia en el oeste y por Libia en el sudeste. El país está dividido en dos regiones: el norte, bien abastecido de agua dulce; y el sur, con un clima semiárido. El clima del país está directamente influenciado por el viento marino, ya que las playas de Túnez tienen una extensión de más de 1298km, por lo que se reúnen las condiciones necesarias para la instalación de una central de este tipo, y los resultados obtenidos han resultados muy prometedores [27].

1.5.5. Energía geotérmica

La energía geotérmica es la energía del interior terrestre, originada con procesos físicos complejos que allí ocurren. Los usos de esta energía datan de la prehistoria, y los etruscos, romanos, griegos, indios, chinos, mejicanos y japoneses dejaron evidencias de haber hecho uso de aguas termales desde tiempos antiguos, dado que pensaban que tenían propiedades curativas [28].

La temperatura del suelo a cierta profundidad permanece prácticamente constante a lo largo del año, ya que las fluctuaciones de temperatura en la superficie disminuyen con la profundidad debido a la inercia térmica del terreno. La energía se extrae mediante intercambiadores geotérmicos constituidos por una serie de conductos de polietileno reticulado, que tiene una alta resistencia. El otro fluido en el circuito es agua o un anticongelante respetable con el medioambiente [1].

A pesar del crecimiento del uso de energía geotérmica, debido a la concienciación sobre el uso de energía renovable y a la popularidad del recurso geotérmico, la utilización de la energía geotérmica suele centrarse en el uso agrícola, procesos industriales y calentamiento de piscinas, y su uso para la desalinización de agua es bastante limitado [29]. Esto puede observarse en el gráfico 9.

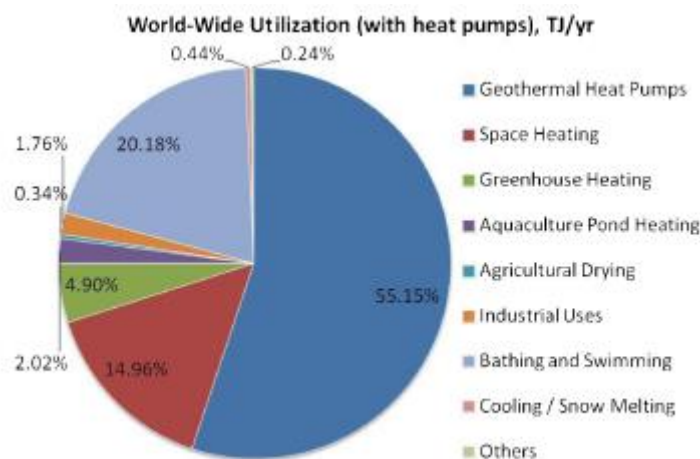


Gráfico 9: Usos de la energía geotérmica [29]

Algunos de los problemas asociados a la energía geotérmica es que no puede soportarse, así como distintos problemas medioambientales como posible emisión de ácido sulfhídrico, contaminación de aguas próximas, contaminación térmica y deterioro del paisaje [1].



1.5.6. Biomasa

La energía de la biomasa es un término genérico aplicado a la energía obtenida por la combustión de material orgánico. Esta biomasa, en la forma de residuos industriales y agrícolas, ha generado electricidad por muchos años con turbinas de vapor convencionales.

Otra forma de energía relativa a la agricultura es el biogás. El estiércol de los animales se acumula en tanques especiales, y se produce gas metano. Este gas puede ser utilizado directamente en un motor diésel para generar electricidad a través de un generador [1].

El crecimiento de esta fuente de energía trae consigo una serie de ventajas, como el desarrollo económico en zonas rurales o la restauración de áreas en desuso donde existían actividades agrícolas y forestales previas. Además los biocombustibles no contribuyen con el calentamiento global, dado que las emisiones emitidas durante la combustión se anulan con la cantidad absorbida por las plantas que se utilizan para la fabricación del combustible. Se estima que a finales de siglo se dedicaran unas 400 millones de hectáreas para plantaciones de biomasa, aunque existe la duda de si la energía obtenida justificará el esfuerzo realizado [30].

1.5.7. Energía nuclear

Incluiremos la energía nuclear dentro del siguiente apartado, debido a que comparte varias de las ventajas de las energías renovables, como la no emisión de contaminantes.

La energía se obtiene en el interior del reactor por **fisión nuclear**. Cuando un neutrón choca con el combustible (generalmente uranio) rompe el átomo, liberando una gran cantidad de energía, así como partículas radioactivas y más neutrones que chocarán contra otros átomos formando una reacción en cadena (figura 6) [31]. Otro uso de la energía nuclear es la obtención de ^{239}Pu , isótopo del plutonio alternativa al uranio para la fabricación de armas atómicas, siendo esto una de las principales causas de la **controversia de este tipo de centrales** [32].

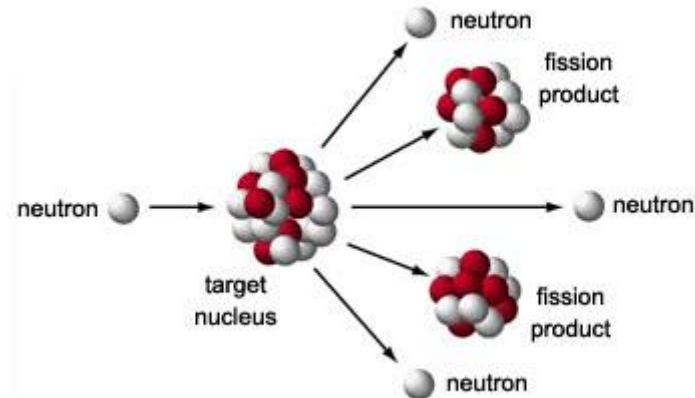


Figura 6: Fisión nuclear [33]

El acoplamiento de las centrales nucleares a la destilación de agua es una tecnología muy reciente y que cuenta con una experiencia muy limitada. La primera central que ha operado de esta manera es la antigua central de Shevchenko (URSS), la cual se muestra en la figura 7, y actualmente es conocida como central nuclear de Aktau (Kazajstán) desde 1992. Esta central, ubicada cerca del mar caspio, suministraba 120.000m³/día a la ciudad. En invierno el complejo, formado por el reactor, de 150 MWe, tres centrales termoeléctricas y una planta de desalinización, funciona como una central para calefacción urbana, mientras que en verano casi todo el calor se emplea en la desalinización. En 1994 la central tuvo que cerrar por falta de fondos para comprar combustible [34].

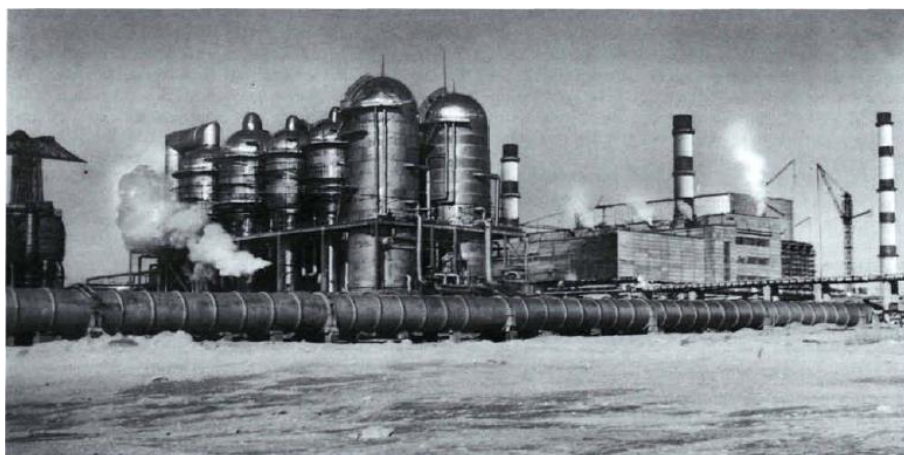


Figura 7: Central nuclear de Shevchenko, URSS [34].



Las técnicas de desalinización de agua requieren una gran cantidad de energía, y la energía nuclear es la candidata perfecta para obtenerla. En 1967, el presidente estadounidense Eisenhower y L. L. Strauss, de la Comisión de Energía Atómica, propusieron un ambicioso programa de desarrollo en Oriente Medio como extensión del programa del ex-presidente “Atoms for Peace”. El programa, que recibió el nombre de “A Proposal for Our Time”, tenía idea de promover la paz y la estabilidad en la región. El programa incluía la construcción de tres grandes plantas nucleares, capaces de generar más de un billón de galones de agua al día (3,8 millones de m³). Además, las plantas también podían operar en la generación de electricidad [35].

En las últimas décadas se han llevado a cabo diversos estudios en Japón, EEUU y Alemania, y ya están operando las primeras centrales desde el cierre de Shevchenko, como la Ohi Nuclear Power Generating Station en Japón, la central de California meridional, cuyo diseño y desarrollo fue llevada a cabo por la empresa de suministro de agua Metropolitan Water District de California del Sur y el Departamento de Energía de los Estados Unidos o la central de Ashdod, Israel, cuya instalación resultó de un proyecto conjunto con EEUU [34].

La experiencia de Shevchenko en la utilización de un reactor nuclear para destilar agua ha demostrado su viabilidad técnica y económica. Además, el atractivo adicional de la desalinización nuclear es la relativa estabilidad a largo plazo de los precios del combustible, y la repercusión ambiental mínima en el proceso. El acoplamiento de una central convencional para que empiece a destilar agua es relativamente sencillo y no muy costoso, gracias a los adelantos que han experimentado los diferentes procesos de desalinización en las últimas décadas.

La energía nuclear se presenta como una alternativa interesante para la desalinización de agua. Sin embargo, debe hacer frente a diferentes complicaciones. A pesar de no contaminar, la energía nuclear presenta una serie de riesgos, durante la operación de la central y, mayormente, en la gestión de los desechos radioactivos. El desarrollo de este tipo de centrales requiere de una gran inversión inicial, además, cuenta con una **opinión pública desfavorable**, y en ciertos países existen leyes que ponen trabas a la construcción de centrales nucleares [1].

1.6. Sistemas de desalinización

Los sistemas de desalinización se pueden dividir en dos grandes grupos.

1.6.1. Desalinización directa

Se caracteriza por la utilización directa de energía solar para obtener agua dulce. Es una tecnología sencilla, y cuenta con las ventajas de que puede ser operada por trabajadores no especializados y que requiere de muy poco mantenimiento, siendo esta la tecnología empleada en aquellos países donde a la escasez de agua se une una escasez económica que impide la instalación de sistemas que requieran una gran inversión de capital.

El ejemplo más sencillo de destilación directa se produce en la naturaleza por medio del **efecto invernadero**. La radiación solar calienta el agua de la superficie del mar, evaporándola. Esta agua precipitará como agua dulce.

Aplicando directamente este concepto es posible obtener agua dulce con un **destilador de caseta**. Consiste en una cubeta con agua salada sobre la que se coloca un cristal en forma de V, que es el que da nombre al sistema por la semejanza física con el tejado de una caseta. La radiación solar atraviesa el cristal y calienta el agua de la cubeta. El agua se evapora al aumentar su presión, y el vapor de agua condensa en el cristal y es recogida directamente. El cristal actúa como una trampa, ya que deja pasar la radiación solar pero es opaco a la radiación refractada [1]. Un esquema de funcionamiento es la figura 8.

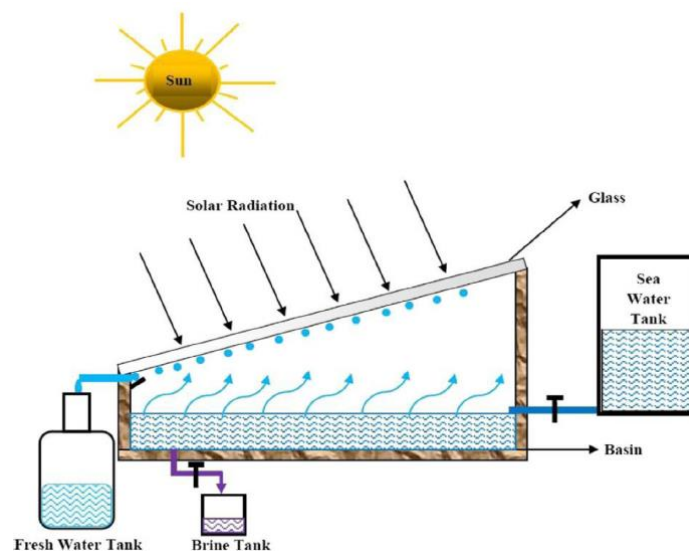


Figura 8: Destilador de caseta [36].

Otro sistema de desalinización directa es el **destilador de cascada** (figura 9). En contra de lo que su nombre parece indicar, durante su funcionamiento el agua se encuentra prácticamente estática. Recibe este nombre porque durante su llenado el agua sí que cae como lo haría en una cascada. La idea del destilador en cascada la misma que la del destilador de caseta. Un destilador de cascada cuenta con varias cubetas o estanques situados a distintas alturas como si fueran escalones. Esta distribución se debe a que las masas de agua más pequeñas se calientan más rápidamente [1].

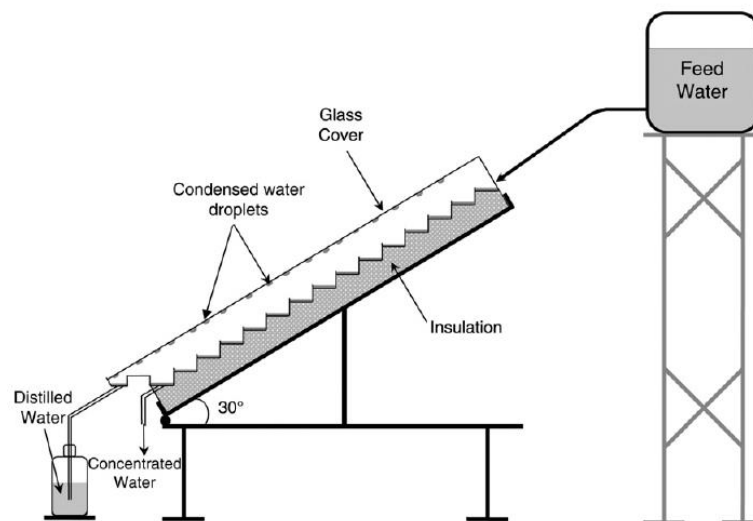


Figura 9: Destilador de cascada [37]

Los sistemas de desalinización directa no han experimentado un desarrollo apreciable en las últimas décadas. Apenas existen grandes plantas en operación que puedan abastecer poblaciones grandes, y en las que se han construido no se han obtenido resultados que estimulen la inversión en este tipo de tecnología, ya que no se han conseguido superar las grandes limitaciones de estos sistemas: la baja eficiencia y las grandes pérdidas de calor a través del cristal [38].

1.6.2. Desalinización indirecta

Un sistema de desalinización indirecta consta de dos subsistemas: un colector de energía renovable y una planta para aprovechar la energía para destilar agua. Se denomina desalinización indirecta porque es necesario un fluido intermedio para conectar ambos subsistemas. Son sistemas más complejos, y son capaces de destilar un volumen de agua mucho mayor.

Los procesos de desalinización se clasifican en dos grandes grupos según el proceso [39]:

- ***Procesos de cambio de fase***
- ***Procesos de membrana***

Los procesos de cambio de fase aprovechan la diferencia entre el punto de ebullición del agua y el de las sales disueltas. Esta diferencia se debe a que los iones de sal ocupan el espacio entre las moléculas de agua. Cuando la temperatura aumenta, las moléculas comienzan a moverse con mayor velocidad, pero estas sales disueltas provocan que colisionen con menor frecuencia, y se liberan menos moléculas de vapor de las que se liberarían en agua pura.

Al calentar el líquido hasta que alcance la fase de vapor y condensarlo después obtenemos una cantidad de agua con la salinidad deseada, y otra cantidad de agua con una mayor concentración de sales, la salmuera sobrante. Esta salmuera sobrante debe devolverse cumpliendo ciertos parámetros medioambientales, ya que un aumento brusco de la salinidad y la temperatura local tendría un gran impacto sobre la flora y la fauna de la zona.

- **Multi-stage flash(MSF)**

En español podría traducirse como *evaporación instantánea multietapa*. El sistema está compuesto por una serie de elementos llamados *stages*, o en español, etapas. En cada una de las diferentes etapas se produce una evaporación parcial del agua salada. El vapor condensa en la superficie exterior de los tubos del condensador de etapa, y gotea sobre una bandeja, donde es recogida. La salmuera restante pasa a la siguiente etapa, donde se repetirá el ciclo de evaporación descrito. Estas instalaciones cuentan con unas 10-30 etapas, en cada cual la temperatura desciende unos 2°C. La presión va disminuyendo en las diferentes etapas, de manera que el agua se encuentre sobrecalentada y se convierta en vapor [1]. El esquema de funcionamiento se puede observar en la figura 10.

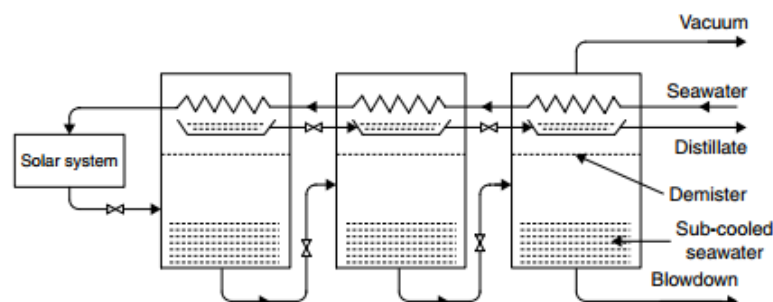


Figura 10: Sistema MSF [1]

El sistema de desalinización MSF es el predominante para la desalinización de agua de mar en la zona del Golfo Pérsico. Es el sistema de desalinización más fiable, y también el que tiene un mayor recorrido, ya que lleva en operación más de 50 años. La primera planta se construyó en Kuwait en el año 1959, y tenía una capacidad de unos 2 MIGD (unos 9 millones de litros/día). Desde entonces se han realizado esfuerzos para aumentar la producción de agua apta para el consumo. Por ejemplo, la central de Shuweith, en Emiratos Árabes, construida en 2002, produce unos 17.5 MIGD (80 millones de litros/día) [40].

– **Multi-effect destillation (MED)**

O destilación multi-efecto. Está compuesto por un gran número de evaporadores o efectos. El vapor de un efecto será usado como fluido caliente en el efecto siguiente, provocando la evaporación de parte del agua salada, y aprovechándose para calentar el flujo de agua de alimentación. El vapor producido calentará el siguiente efecto, y así sucesivamente. Para que este procedimiento sea posible, el efecto que se está calentando debe mantenerse a una presión menor que el efecto que ha originado el vapor. El vapor destilado se introduce en un condensador que se encuentra situado al final del último efecto, donde se obtiene el destilado final, y sirve para calentar el agua de mar recogida [1]. El funcionamiento de una central MED se puede ver en la figura 11.

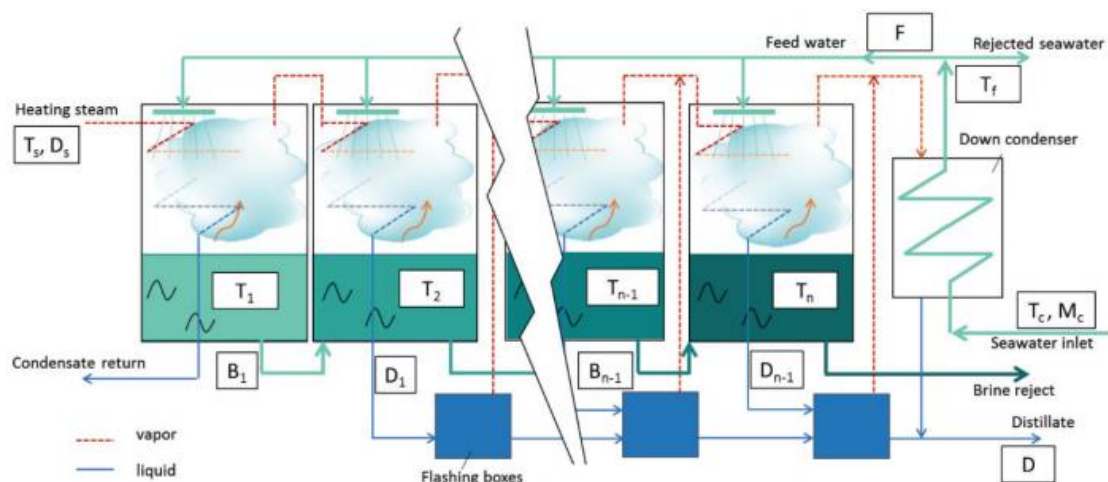


Figura 11: Esquema de un MED [41]

El proceso operativo es similar al de una planta MSF, pero la destilación multiefecto ofrece una serie de ventajas con respecto a ella. El consumo de energía



en el proceso es sensiblemente menor, y las plantas MED tienen un mayor potencial para el diseño de plantas de alto rendimiento. Además, son menos sensibles a la corrosión y a la cristalización de la sal [42], dado que la temperatura de la salmuera que circula por los efectos es menor. Esto resulta ser una gran ventaja, ya que por los evaporadores circula agua con una elevada salinidad y vapor, **siendo ambos fluidos altamente corrosivos**. Comparada con las otras técnicas de desalinización, tiene una mayor vida de operación, requiere de un menor capital para su instalación y consume menos energía de bombeo [43].

Las plantas MED se integran dentro plantas térmicas, donde se produce la energía calorífica necesaria para generar el vapor que inicia el proceso, y en ellas se produce agua dulce y electricidad mediante un sistema de cogeneración [44].

Una de las alternativas más utilizadas para alimentar plantas MED es la energía solar de concentración, que además permite la hibridación de estas con un sistema de desalinización de ósmosis inversa. Se han realizado diversos estudios sobre este tipo de centrales, donde el ciclo MED se alimenta con el vapor a baja presión que sale de la turbina de contrapresión y el sistema de ósmosis inversa se alimenta con la electricidad producida por la misma turbina. Además, el coste de producción de agua al acoplar ambos sistemas desciende alrededor de un 10%, y el tiempo de vida de la instalación se incrementa de 20 a 30 años [45].

Por estos motivos las plantas multi-efecto están experimentando un gran desarrollo, en favor de las plantas MSF y RO. Estas plantas suelen operar con energía termosolar, ya que el vapor generado se utiliza directamente para iniciar el proceso, introduciéndolo en el primer efecto.

– Proceso de compresión de vapor (VC)

En una planta VC, la recuperación de calor se consigue al aumentar la presión del vapor de cada etapa mediante un compresor.

La temperatura de condensación se incrementa y puede ser utilizada para suministrar energía a otras etapas. Igual que en un sistema MED, el vapor producido en el primer efecto se utiliza para calentar el segundo efecto, que se encuentra a una presión menor. El vapor que se produce en el último efecto pasa por el compresor, donde aumenta su temperatura de saturación antes de devolverlo al primer efecto.

Diversos estudios han demostrado la poca conveniencia de este sistema, dado que los requerimientos de energía mecánica obligan a la utilización de una fuente de

energía primaria, como un motor diésel, lo que hace que el colector solar resulte redundante. Sin embargo, el sistema VC puede ser empleado junto a un sistema MED, y operado en periodos de poca radiación solar o durante la noche, como el que se muestra en la figura 12.

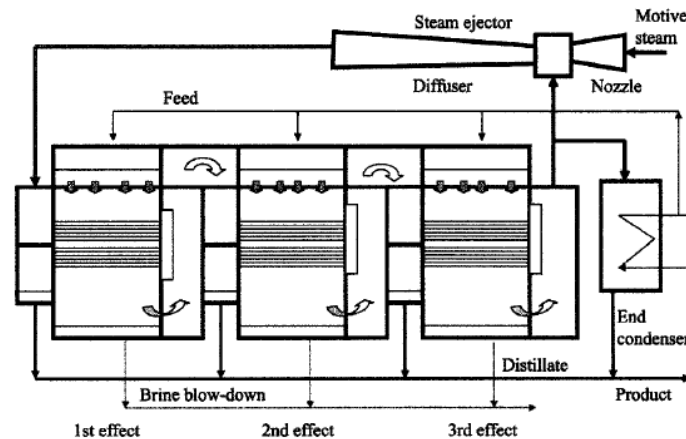


Figura 12: Esquema de planta MED/VC [40]

En los procesos de membrana o de una sola fase utilizamos electricidad para ionizar las sales del agua salada.

– Ósmosis inversa (RO)

La desalinización por ósmosis inversa consiste en aumentar la presión de la salmuera con una bomba hasta alcanzar la presión osmótica, que en el caso del agua de mar es de unos 80 bares, forzándola a atravesar la membrana semipermeable. De esta manera, a un lado de la membrana queda la salmuera, y al otro lado el agua dulce [46]. Un esquema muy sencillo de este concepto se muestra en la figura 13. El desecho de la salmuera está ampliamente condicionado por la localización de la planta. En las centrales costeras, la salmuera se descarga directamente al mar, mientras que en las plantas que se encuentran en el interior debe disminuirse la concentración en sales antes de desechar la salmuera. También pueden emplearse técnicas de evaporación para concentrar la salmuera, creando un desecho sólido que resulta más fácil de desechar [47].

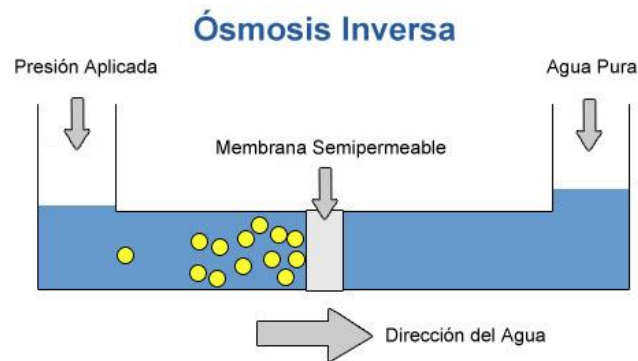


Figura 13: Esquema de funcionamiento de la RO [48].

A pesar de que el concepto de la separación mediante membrana se conoce desde el siglo XVIII, no se utilizó para desalinizar agua hasta el año 1957, cuando se desarrolló una película de diacetato de celulosa que conseguía rechazar la sal con un 96% de efectividad. Esta película tenía una baja permeabilidad, y resultó poco útil para aplicaciones prácticas, pero sirvió de base para el trabajo de Loeb y Sourijajan, cuya membrana alcanzó un alto valor de caudal y de rechazo de la sal, debido a su pequeña superficie y a su estructura porosa.

La tecnología de membrana experimentó un gran desarrollo desde entonces, para su utilización en laboratorios y procesos industriales. En el año 1985, Cadotte introdujo mejoras en las membranas, logrando aumentar la eficiencia del proceso y ampliando los horizontes de la RO [49].

En el año 2013, las plantas RO suponían el 65% de la capacidad total instalada de desalinización en el mundo, y el 59% de los que se alimentan con agua de mar. Diversos expertos creen que continuará como la tecnología dominante de desalinización, debido a los bajos costes de operación, consumo de energía y las mejores tecnológicas [50] y [51].

– **Electrodiálisis**

La electrodiálisis consiste en reducir la salinidad extrayendo las sustancias ionizadas disueltas en una disolución acuosa, bajo el efecto de una diferencia de potencial eléctrico a través de membranas. Para ello se utiliza un campo eléctrico de corriente alterna (figura 14).

Debido a que las necesidades energéticas del sistema son proporcionales a la salinidad de agua, la electrodiálisis puede emplearse cuando la salinidad del agua no contiene más de 6000ppm de sales disueltas. Además la baja conductividad hace que el proceso no sea apropiado para agua que contenga menos de 400ppm de sales disueltas.

La electrodiálisis puede llevarse a cabo directamente con la diferencia de potencial producida por el Sol y recogida con los paneles fotovoltaicos [1].

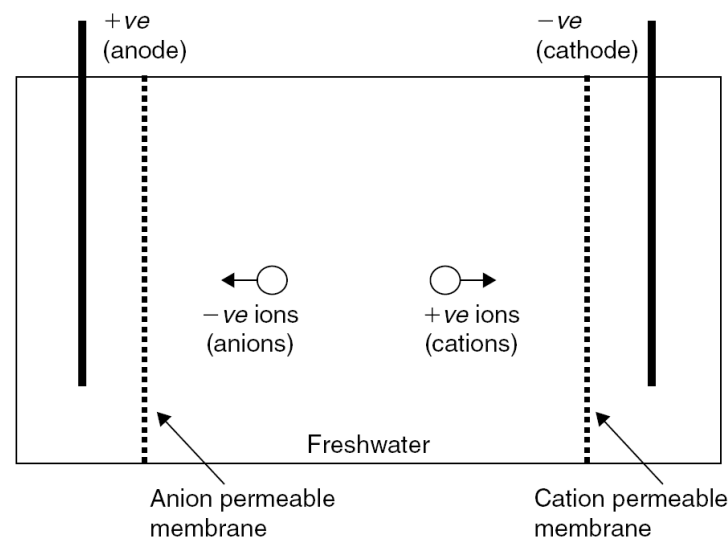


Figura 14: Esquema de funcionamiento de la electrodiálisis [1]

En el gráfico 10 se muestran tanto las fuentes de energía renovable más empleadas en la actualidad como los sistemas de desalinización más populares. Si se compara con la tabla 1, se puede comprobar que los sistemas de desalinización van muy ligadas a la fuente de energía que se utilice.

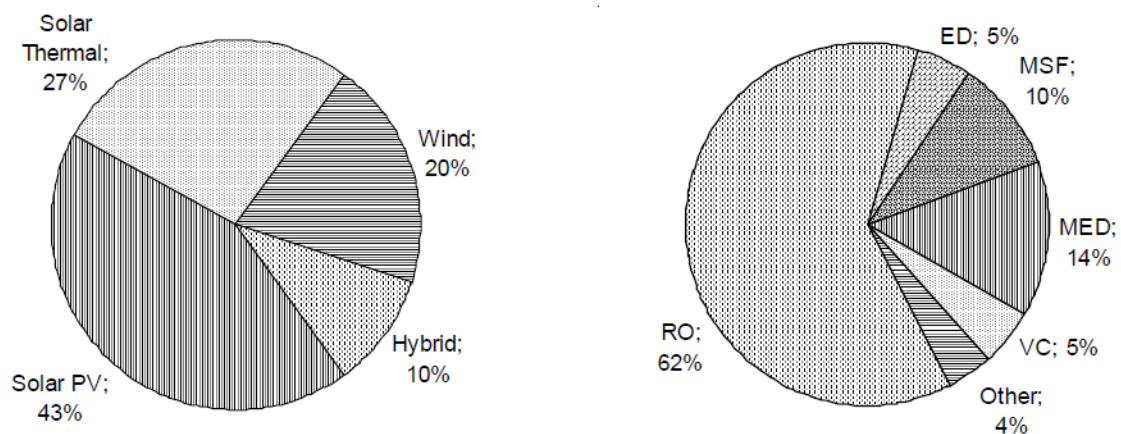


Gráfico 10: Energías renovables empleadas en desalinización de agua [38]

Tabla 1

Usos de energía renovable para cada técnica de desalinización [1]

Energía renovable	Tecnología de desalinización	
	Opción 1	Opción 2
Termosolar	MED	MSF
Fotovoltaica	RO	ED
Eólica	RO	MVC
Geotérmica	MED	

:





2. Selección del tipo de central y procedimiento de cálculo



2.1. Selección del tipo de central

Para seleccionar el tipo de central se deben seguir los siguientes pasos [52]:

- Seleccionar la fuente de energía que abastecerá nuestra central.
- Seleccionar el método de desalinización a emplear. Esta elección deberá ser consecuente con la fuente de energía escogida.
- Ubicar la central en un lugar que reúna las características escogidas.

En base a lo expuesto en el capítulo 1, se elegirá como **fuentes de energía renovable** para la central la energía solar, ya que aquellas regiones en las que existe un mayor déficit de agua potable son aquellas en las que hay mayor radiación solar [44]. Además, se ha elegida una planta CSP, por sus siguientes **ventajas** sobre la solar fotovoltaica [23]:

- La principal ventaja es la capacidad de construcción de un **sistema de almacenamiento de energía (TES)**, permitiendo operar a la central en periodos de baja radiación solar.
- La **eficiencia** de los sistemas de concentración se estima alrededor de un 42%, mientras que la de los PV es un 15%.
- **Coste de la energía por unidad de área.** Produciendo la misma energía, una planta CSP necesita un terreno cuatro veces más pequeño que una planta PV, y el coste de la producción es cuatro veces menor.

Las plantas CSP+TES suelen funcionar con torres solares, de modo que será el método obtención de energía en este proyecto. Las ventajas de la torre solar frente a otras CSP han sido expuestas en el capítulo 1.

El **sistema de desalinización** de la planta será la destilación multi-efecto (MED) (Tabla 1). Sus ventajas frente a la desalinización MSF se han expuesto en el apartado del MED en el capítulo I, destacando la menor sensibilidad a la corrosión y a la cristalización, y su potencial para construcción de plantas de alto rendimiento, como la que se quiere diseñar.

Por último se debe localizar nuestra central en un lugar donde haya una **alta radiación solar**, dentro del 'Sun Belt' (MENA, Mediterráneo, California, Nevada, Nuevo Méjico, etc), y donde se pueda disponer de un **suministro de agua de mar constante**.

Localizaremos la central **dentro de la península**, ya que en zonas del sur se reúnen las condiciones necesarias, y porque España es el líder a nivel europeo y uno de las grandes potencias a nivel mundial en desalinización de agua utilizando CSP, como se muestra en el gráfico 11.

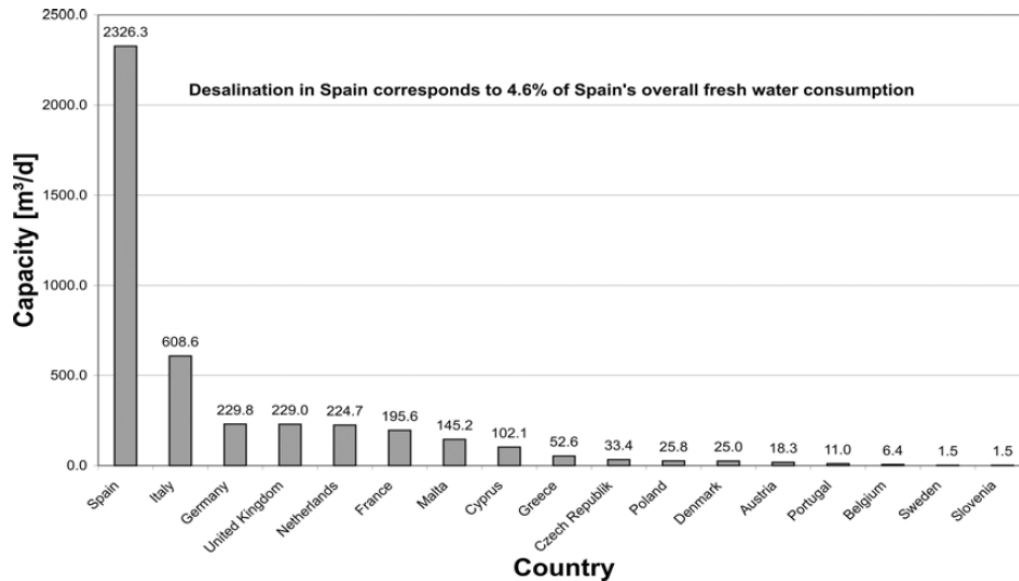


Gráfico 11: Capacidad en m³/d en Europa [64]

El lugar seleccionado deberá reproducir lo más fidedignamente posible las condiciones expuestas. Por ello se ha elegido la provincia de **Almería**, una de las que más kWh/m² recibe anualmente del Sol, y la que más se acerca a las condiciones climáticas de la región MENA, una de las mayores inversoras en desalinización de agua actualmente. El mapa de radiación del Mediterráneo y la región MENA se muestra en la figura 15.

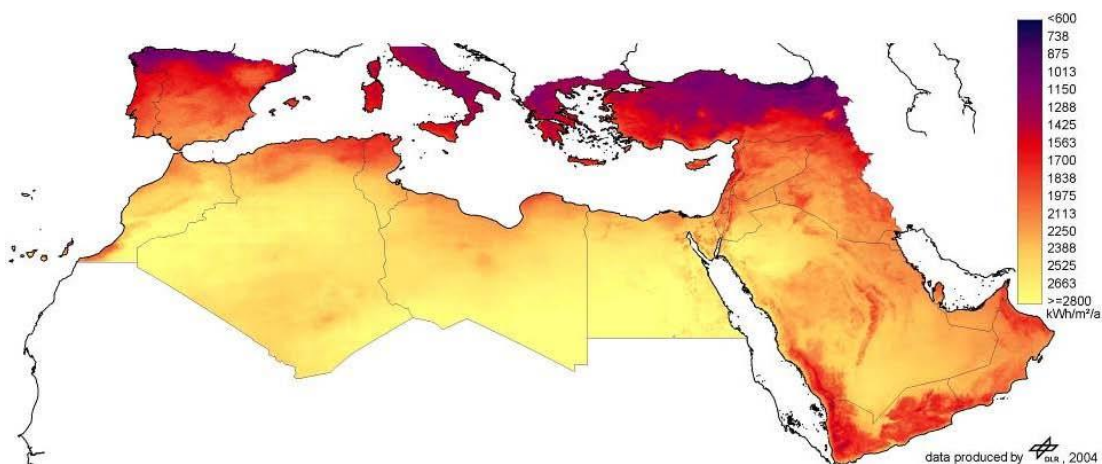


Figura 15: Mapa de radiación solar en kWh/m²/año [53]

Además, en la provincia de Almería se encuentra la **Plataforma Solar de Tabernas (PSA)**, perteneciente al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), el mayor centro de investigación, desarrollo y ensayos de Europa dedicado a las tecnologías solares de concentración. Su ubicación en la Península se ve en la figura 16.



Figura 16: Ubicación de la central de la que se realizarán los cálculos [54]

Dentro de la PSA se dispone de una **unidad piloto de desalinización MED mediante torre de concentración**, la cual podrá tomarse como base para el estudio de la viabilidad del proyecto (figura 17).

La figura 18 muestra el esquema de la planta que se va a diseñar.



Figura 17: Torre de concentración y campo de heliostatos de la PSA, Tabernas, Almería [55]

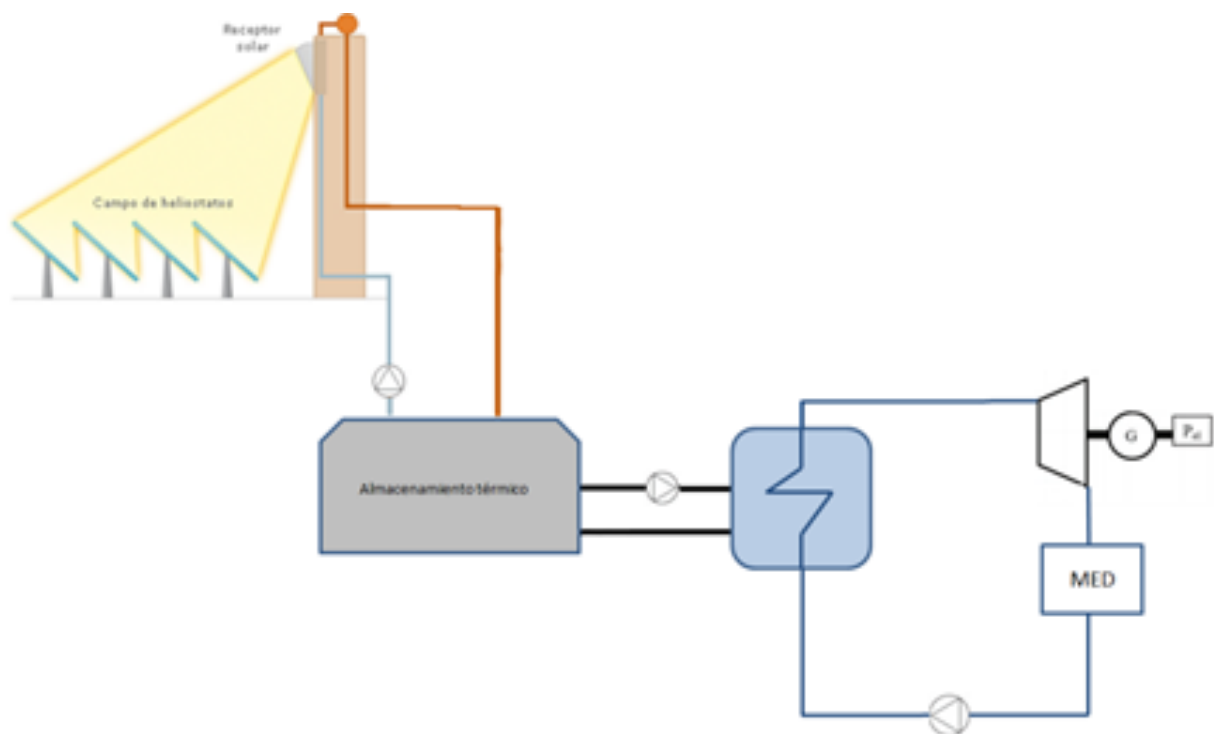


Figura 18: Esquema de la central a diseñar. Elaboración propia.



2.2. Procedimiento de cálculo

La central contará con diferentes subsistemas: *el subsistema receptor, el ciclo de la sal fundida, el ciclo rankine de vapor, y el ciclo de destilación.*

El diseño comenzará con los cálculos correspondientes al ciclo de desalinización. Tras fijar los parámetros necesarios se calcularán las temperaturas y gastos másicos del sistema, obteniendo la temperatura del vapor a la salida de la turbina T_s , que será el dato que relacione el ciclo de desalinización con el ciclo rankine. También se debe comprobar que se cumplen las restricciones tecnológicas de los intercambiadores de calor, así como las de la salinidad del agua. Se estudiarán distintos diseños, y se analizará la influencia de los distintos parámetros en producción de la estación multi-efecto.

Con esta temperatura de vapor, y sabiendo que el fluido debe ser líquido saturado a la entrada de la bomba y vapor saturado a la salida de la turbina, se fijará la presión de alta del ciclo y se podrán obtener las propiedades en todos sus puntos.

A continuación debemos diseñar el intercambiador de calor que conectará el subsistema receptor con el ciclo Rankine. El intercambiador transfiere la energía calorífica recogida en la torre al ciclo de vapor. Por la torre circulará un caudal másico de sal fundida, que cederá el calor al agua que sale de la bomba. Se diseñará la geometría del intercambiador de calor, que se dividirá en tres partes, y mediante el método Kern calcularemos la longitud de cada una de las partes.

Por último debemos diseñar el subsistema receptor, que consiste en la torre de concentración y el campo de heliostatos. Tomaremos los datos de la torre y su receptor de otras torres operativas, y fijaremos la potencia de la torre.

A partir de estos datos, y con ayuda del software de cálculo Matlab, se fijará el número de heliostatos que necesita la central para alcanzar la potencia requerida mediante un proceso de cálculo iterativo. Se ubicarán los heliostatos y se calculará la eficiencia del campo.

En la figura 19 se puede ver este proceso realizado en un diagrama de flujo.

En los siguientes capítulos se estudiarán las ecuaciones que rigen cada subsistema por separado.

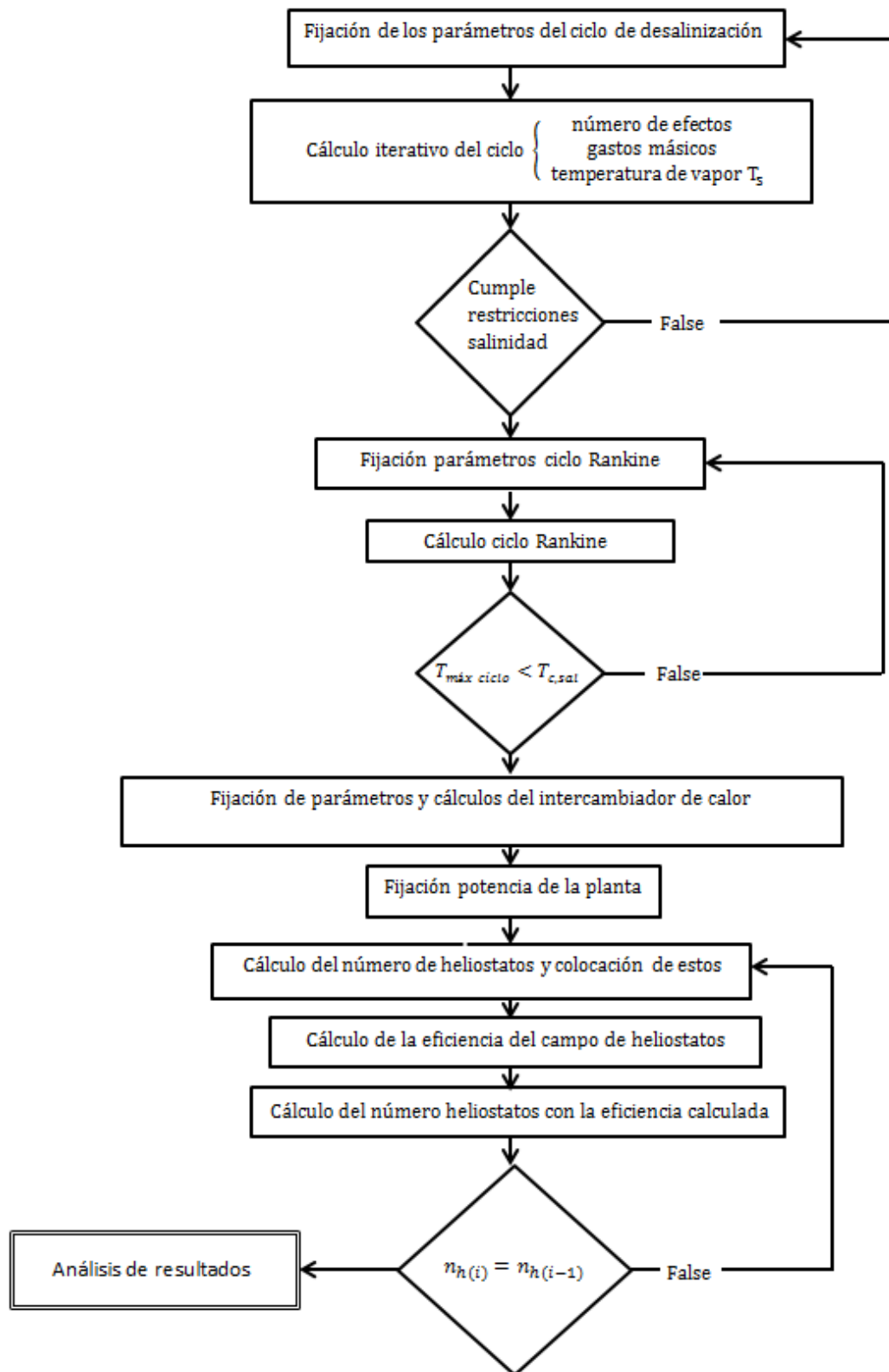


Figura 19: Diagrama de flujo del cálculo iterativo del sistema.



DISEÑO Y ANÁLISIS TÉRMICO DE UNA PLANTA DESALINIZADORA SOLAR DE TORRE DE
CONCENTRACIÓN



3. Ciclo de desalinización

3.1. Ecuaciones

El proceso de operación de una planta MED se ha detallado en el capítulo 1.

El subsistema objeto de estudio en este trabajo consistirá en:

- n efectos
- un condensador al final de los efectos, en el que se precalentará el agua cogida del mar y se sacará el destilado total del ciclo
- bombas para impulsar los fluidos a través de los conductos

Este subsistema se ha esquematizado en la figura 20.

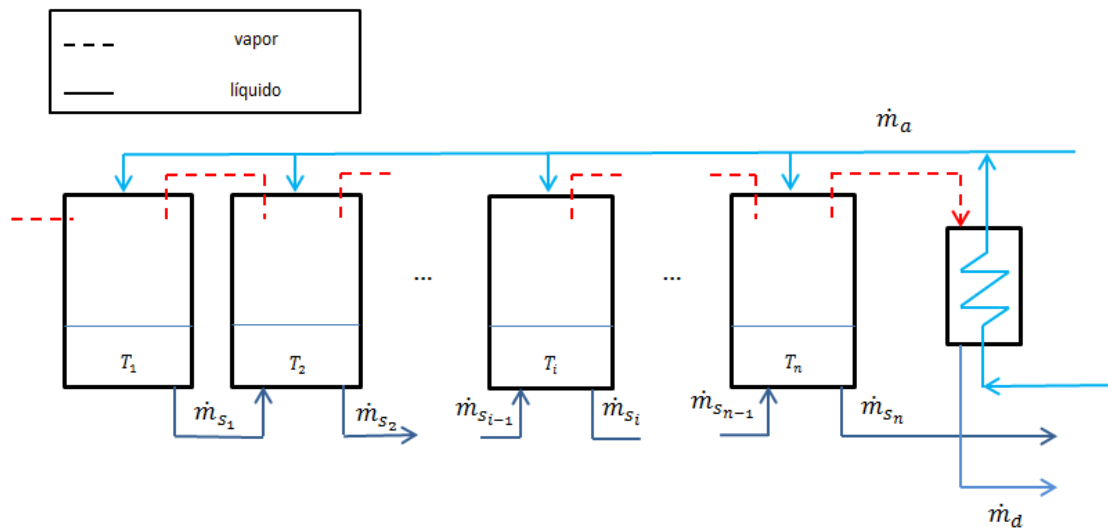


Figura 20: Esquema funcionamiento de los multi-efectos. Elaboración propia.

Por simplicidad de los cálculos, se tomarán las siguientes **hipótesis**:

- Todos los elementos del sistema operarán en estado estacionario.
- El incremento de temperatura entre las salmueras de los efectos se supondrá constante.

$$T_{i+1} = T_i - \Delta T$$



- El caudal másico de alimentación se repartirá uniformemente entre todos los efectos.
- Las pérdidas de calor con el entorno se asumirán despreciables.
- El consumo de las bombas que impulsan el agua por los conductos se considera despreciable.

Para la realización de los cálculos de la planta existen las siguientes **restricciones** que han de tenerse en cuenta [56]:

- El incremento de temperatura mínima entre efectos, incluyendo pérdidas termodinámicas, queda determinada sobre unos 2-2.25K [57], [58], y el incremento máximo es de unos 5K. Aumentar la caída de temperatura entre efectos por encima de este valor produciría una temperatura máxima de salmuera elevada, lo que supondría altos costes de operación [59].

$$2.25 < \Delta T < 5K \quad (I)$$

- Para el correcto funcionamiento del condensador situado a continuación de los efectos, la temperatura de la salmuera en el último efecto debe estar como mínimo 3K por encima de la temperatura del flujo de alimentación

$$T_n - T_a > 3K \quad (II)$$

- Debido a la limitación de la eficiencia del último intercambiador de calor, la diferencia entre la temperatura de alimentación y la temperatura de agua obtenida del mar debe estar dentro del siguiente intervalo:

$$3 < T_a - T_m < 10K \quad (III)$$

- La salinidad de la salmuera nunca debe de superar un valor crítico, debido a que la sal podría cristalizar, perjudicando al correcto funcionamiento del subsistema e incluso causando daños en los conductos [60].

$$X_s < X_{CaSO_4 \text{ lim}} - \Delta X \quad (IV)$$



donde ΔX es un factor de seguridad que fijaremos como $\Delta X = 0,1X_s$.

- El valor de la salinidad de la salmuera que se expulsa no puede superar un valor límite por cuestiones medioambientales. Fijaremos ese valor en 70000 ppm.

$$X_s < 70000 \text{ ppm} \quad (V)$$

Esta salmuera no añade sal al mar, solo le devuelve la que previamente tenía. Sin embargo un aumento elevado local de la salinidad podría suponer un problema para las especies más sensibles, por lo que el desecho de la salmuera debe hacerse de forma que se diluya rápidamente en la masa de agua de mar.

En los casos más complicados, cuando hay organismos con poca tolerancia a la salinidad cercanos a la costa, la salmuera se distribuye por varios difusores. Al salir el choque con el agua de mar produce una agitación que homogeniza en salinidad toda la masa de agua de mar cercana a la salida del difusor [61].

Las **ecuaciones** del MED son [45]:

- Temperatura de los efectos

$$\Delta T = \frac{T_i - T_n}{n - i} \quad (3.1)$$

La temperatura del vapor dentro de un efecto es inferior a la de la salmuera, debido a que la presencia de sales disueltas incrementa su punto de ebullición. Esta temperatura se estima como la de la salmuera menos la elevación del punto de ebullición (BPE).

$$T_{vi} = T_i - BPE_i \quad (3.2)$$



Este valor suele tomarse como constante por simplicidad de cálculo, de valor 1K [62]. Una aproximación más exacta para agua de alta salinidad puede obtenerse de la ecuación [63]:

$$BPE_i = A \left(\frac{X_i}{34.46} \right) + B \left(\frac{X_i}{34.46} \right)^2 \quad (3.3)$$

donde

$$A = 0.2009 + 0.2867 \cdot 10^{-2} T_i + 0.002 \cdot 10^{-4} T_i^2$$

$$B = 0.0257 + 0.0193 \cdot 10^{-2} T_i + 0.0001 \cdot 10^{-4} T_i^2$$

válida para los intervalos $20 \leq T \leq 180^\circ\text{C}$; $35000 \leq X_i \leq 100000$

– Eficiencia del primer efecto

A partir de la temperatura del primer efecto, se podrá calcular la temperatura del vapor con la eficiencia.

$$\varepsilon = \frac{T_1 - T_a}{T_s - T_a} \quad (3.4)$$

– Caudal másico de alimentación

$$\dot{m}_{a_i} = \text{cte} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\dot{m}_{a_i}}{n} \right) = \dot{m}_a \quad (3.5)$$

– Caudal másico de salmuera

Obtenemos la ecuación necesaria para calcular el caudal másico de salmuera mediante balances de masa.

$$\text{Efecto 1} \rightarrow \dot{m}_{s_1} = \dot{m}_{a_1} - \dot{m}_{d_1}$$

$$\text{Efecto 2} \rightarrow \dot{m}_{s_2} = \dot{m}_{a_2} - \dot{m}_{d_2} + \dot{m}_{s_1} = \dot{m}_{a_2} - \dot{m}_{d_2} + \dot{m}_{a_1} - \dot{m}_{d_1}$$

$$\text{Efecto 3} \rightarrow \dot{m}_{s_3} = \dot{m}_{a_3} - \dot{m}_{d_3} + \dot{m}_{s_2} + \dot{m}_{s_1} = \dot{m}_{a_3} - \dot{m}_{d_3} + \dot{m}_{a_2} - \dot{m}_{d_2} + \dot{m}_{a_1} - \dot{m}_{d_1}$$



$$\dot{m}_{s_i} = \sum_{i=1}^i (\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{di}) \quad (3.6)$$

– Caudales máxicos de destilado

Las ecuaciones para calcular el destilado de los efectos se obtienen a partir de balances de energía.

Balance de energía en el primer efecto

$$\dot{m}_s \cdot \Delta h_v = \dot{m}_1 \cdot [h''(T_{v1}) - h'(T_1)] + \dot{m}_a \cdot C(T_a, T_1, X_a) \cdot (T_1 - T_a) \quad (3.7)$$

Balance de energía en el segundo efecto

$$\begin{aligned} \dot{m}_2 \cdot [h''(T_{v2}) - h'(T_{v1})] = \\ = \dot{m}_1 \cdot \Delta h(T_{v1}) - \dot{m}_a \cdot C(T_a, T_2, X_a) \cdot (T_2 - T_a) + \dot{m}_{s1} \cdot C(T_{v2}, T_2, X_{s2}) \cdot (T_1 - T_2) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Balance de energía en un efecto i

$$\begin{aligned} \dot{m}_{di} \cdot [h''(T_{vi}) - h'(T_i)] = \dot{m}_{d(i-1)} \Delta h(T_{v(i-1)}) + \\ + \left(\sum_{i=1}^{i-2} \dot{m}_{di} \right) [h'(T_{v(i-2)}) - h'(T_{v(i-1)})] - \dot{m}_a \cdot C(T_a, T_i, X_a) (T_i - T_a) + \\ + \dot{m}_{s(i-1)} C(T_{vi}, T_i, X_{si}) (T_{(i-1)} - T_i) \end{aligned} \quad (3.9)$$

– Caudal máxico total de destilado

El caudal total destilado se obtiene sumando los caudales de todos los efectos

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_{di} = \dot{m}_d \quad (3.10)$$

– Salinidad de la salmuera

El valor de la salinidad de la salmuera en cada efecto se puede obtener con un balance de masa de sal en el efecto.

Balance de masa en el primer efecto

$$\dot{m}_{a1}(X_{S1} - X_a) - \dot{m}_{d1} \cdot X_1 = 0 \quad (3.11)$$

Balance de masa en un efecto i

$$i \cdot \dot{m}_{a1}(X_1 - X_a) - \sum_{i=1}^i (\dot{m}_{di}) \cdot X_i = 0 \quad (3.12)$$

Balance de masa en el último efecto

$$\dot{m}_a(X_n - X_a) - \dot{m}_d \cdot X_n = 0 \quad (3.13)$$

– Prevención de la cristalización

La cristalización es un fenómeno causado por la concentración excesiva de compuestos inorgánicos en la salmuera. Estas sales pueden precipitar formando una capa delgada que frena el paso del caudal de agua y puede dañar los conductos, por lo que ha de ser evitada a toda costa. La cristalización de las sales se divide en tres etapas, como se muestra en la figura 21 [48].

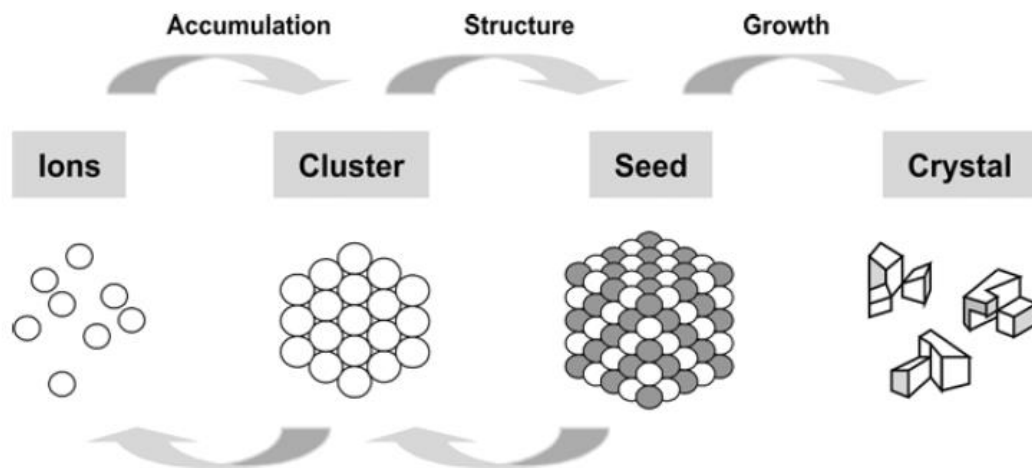


Figura 21: Etapas de la cristalización [64]

Una de las importantes sustancias causantes de la cristalización es el **CaSO₄**, cuyo valor límite en función de la temperatura se obtiene de la siguiente ecuación [60]:

$$X_{CaSO_4,lim} = 0.9 \cdot (457628.5 - 11304.11 \cdot T_1[^\circ C] + 107.5781 \cdot T_1^2[^\circ C^2] - 0.360747 \cdot T_1^3[^\circ C^3]) \quad (3.14)$$

El valor límite de la salinidad disminuye con la temperatura como se muestra en el gráfico 12. Por ello, solo es necesario comprobar si se produce cristalización en el primer efecto únicamente, ya que en el la temperatura de la salmuera es mayor, por lo que si no se produce en el no existe riesgo en los demás efectos.

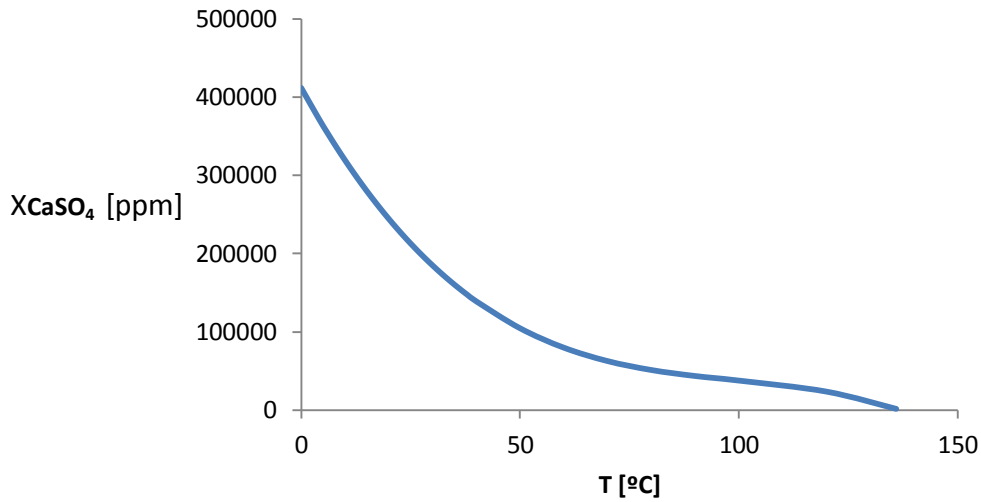


Gráfico 12: Variación de la salinidad del XCaSO₄ con la temperatura

– Cálculo del área de los efectos

El área de transferencia de cada efecto puede calcularse a partir del calor latente de evaporación y de la ecuación:

$$Q = U_e A_e \Delta T_e \quad (3.15)$$

De la forma [56]:

$$A_{e1} = \frac{\dot{m}_v [h_v(T_{v1}) - h_{liq}(T_1)]}{U_{e1}(T_s - T_1)} \quad (3.16)$$



$$A_{ei} = \frac{\dot{m}_{d(i-1)} \Delta h_{vi-1} - \dot{m}_a \cdot C(T_i, T_a, X_a)(T_i - T_a)}{U_{ei}(T_{v(i-1)} - T_{vi})} \quad (3.17)$$

$$A_{en} = \frac{\dot{m}_{d(n-1)} \Delta h_{v(n-1)} + \dot{m}_d C(T_{vn}, X_n) - (n-1) \dot{m}_a C(T_n, T_a, X_n)(T_n - T_a)}{U_{en}(T_{v(n-1)} - T_n)} \quad (3.18)$$

Donde el coeficiente global de transferencia de calor U_e depende principalmente del tipo, diseño y material del intercambiador [65], y por simplicidad puede calcularse con la ecuación [66]:

$$U_{ei} = 1.9695 + 1.2057 \cdot 10^{-2} T_i - 8.5989 \cdot 10^{-3} T_i^2 + 2.5651 \cdot 10^{-7} T_i^3 \quad (3.19)$$

Los evaporadores se construyen de acero inoxidable 316L, ya que por su interior circula vapor y agua de elevada salinidad, ambos altamente corrosivos [56]. Para hacerlos más compactos, eficientes, flexibles y fáciles de limpiar, los efectos suelen diseñarse como intercambiadores de calor de placas [67]. Conociendo el área de intercambio de los efectos:

$$A_e = N_p L_p w \quad (3.20)$$

– Diseño del condensador

Los condensadores de las plantas multi-efecto suelen diseñarse como intercambiadores de tubo y carcasa [67]. La carcasa se diseña con un acero inoxidable, como el AISI 316L, y los tubos suelen fabricarse de bronce al aluminio, que tienen elevada resistencia a la corrosión a altas temperaturas y tiene mayor conductividad que el acero inoxidable [56]. El área del condensador puede calcularse:

$$A_c = \frac{\dot{m}_a C(T_a, T_m, X_a)(T_a - T_m)}{U_c \Delta T_{ml}} = N_T N_{pt} \pi D_0 L_T \quad (3.21)$$

donde



$$U_c = 1.7194 + 3.2063 \cdot 10^{-2} T_{vn} - 1.5971 \cdot 10^{-5} T_{vn}^2 + 1.9918 \cdot 10^{-7} T_{vn}^3 \quad (3.22)$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{vn} - T_a) - (T_{vn} - T_m)}{\log\left(\frac{T_{vn} - T_a}{T_{vn} - T_m}\right)} \quad (3.23)$$

– Eficiencia del sistema

La eficiencia del ciclo MED se estima a partir de dos parámetros. El ratio GOR (Gained Output Ratio), compara el gasto másico destilado con el gasto másico de vapor introducido en el primer efecto.

$$GOR = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_v} \quad (3.24)$$

Y el área específica, que compara el área del sistema con el caudal másico destilado obtenido

$$sA = \frac{\sum_{i=1}^n A_{ei} + A_c}{\dot{m}_d} \quad (3.25)$$

Las entalpías de vapor y líquido saturado y los calores latentes pueden obtenerse de las tablas de propiedades del agua o a partir de las siguientes ecuaciones [60]:

$$h_{liq}(T_i) = -0.033635409 + 4.20755011T_i - 6.200339 \cdot 10^{-4}T_i^2 + 4.459374 \cdot T_i^3 \quad (3.26)$$

$$h_v(T_i) = 2501.689845 + 1.806916015T_i + 5.087717 \cdot 10^{-4}T_i^2 - 1.221 \cdot 10^{-5}T_i^3 \quad (3.27)$$

$$\Delta h(T_i) = 2501.897149 - 2.407064037T_i + 1.192217 \cdot 10^{-3}T_i^2 - 1.5863 \cdot 10^{-5}T_i^3 \quad (3.28)$$

$$C(T_i, X_i) = A + BT_i + CT_i^2 + DT_i^3 \quad (3.29)$$

donde

$$\begin{aligned} A &= 4206.8 - 6.6197X_i + 1.2288 \cdot 10^{-2}X_i^2 \\ B &= -1.1262 + 5.4178 \cdot 10^{-2}X_i - 202719 \cdot 10^{-4}X_i^2 \\ C &= 1.2026 \cdot 10^{-2} - 5.3566 \cdot 10^{-4}X_i + 1.8906 \cdot 10^{-6}X_i^2 \\ D &= 6.8777 \cdot 10^{-7} + 1.517 \cdot 10^{-6}X_i - 4.4268 \cdot 10^{-9}X_i^2 \end{aligned}$$



El parámetro que conecta los dos subsistemas es la temperatura de vapor en el primer efecto T_s . Como se ha comentado se llevarán a cabo dos diseños: el primer diseño priorizará el ratio GOR, es decir se centrará en la eficiencia de los multi efectos, y en el segundo diseño se priorizará la eficiencia del ciclo de vapor.

3.2. Procedimiento de cálculo

Las ecuaciones del capítulo IV se resolverán con Matlab R2014a. En primer lugar han de fijarse los parámetros de contorno, así como los valores de las temperaturas para las restricciones (I), (II) y (III). También se introducirán valores para los caudales másicos de alimentación y de vapor entrante en el primer efecto.

Para iniciar la iteración se tomará un número máximo de efectos, y se tomarán unos valores de salinidad para la primera iteración. Estos valores han de ser suficientemente grandes ($X_s \rightarrow \infty$).

La temperatura en los distintos efectos, tanto de la salmuera como del vapor, se calculará con las ecuaciones ec. (3.1) y ec. (3.2). Para el cálculo de la temperatura del vapor en cada efecto, será necesario utilizar la expresión del BPE de la ec. (3.3). Dado que depende de la salinidad, que hasta el momento nos es desconocida, deberá iterarse hasta que la solución de la iteración i coincida con la de la iteración $i-1$. Además, conocidas las temperaturas, puede obtenerse el coeficiente global de transferencia de calor a partir de la ecuación ec. (3.19). La temperatura del vapor que entra en el primer efecto se obtiene a partir de su eficiencia con la ecuación ec. (3.4).

En cada efecto puede calcularse los caudales másicos de destilado y de salmuera con las ecuaciones ec. (3.6), ec. (3.7), ec. (3.8) y ec. (3.9). Del mismo modo se obtiene la salinidad de cada efecto con las ecuaciones ec. (3.11), ec. (3.12) y ec. (3.13). Del mismo modo será necesario iterar.

Cuando tanto el BPE como la salinidad convergen, y se cumplen las restricciones (IV) y (V), se ha obtenido la solución óptima. En caso contrario se deberá realizar una iteración más. Además, si se exceden los límites de salinidad, se restará un efecto al número máximo de efectos fijado.



Una vez hallada la solución óptima, se diseñarán los efectos, con las ecuaciones ec. (3.16), ec. (3.17), ec. (3.18), ec. (3.19) y ec. (3.20). El condensador se diseña con ec. (3.21), ec. (3.22) y ec. (3.23).

Por último, el GOR y el área específica del sistema se calculan con la ec. (3.24) y la ec. (3.25).

En la figura 22 se muestra este procedimiento de cálculo en un diagrama de flujo.

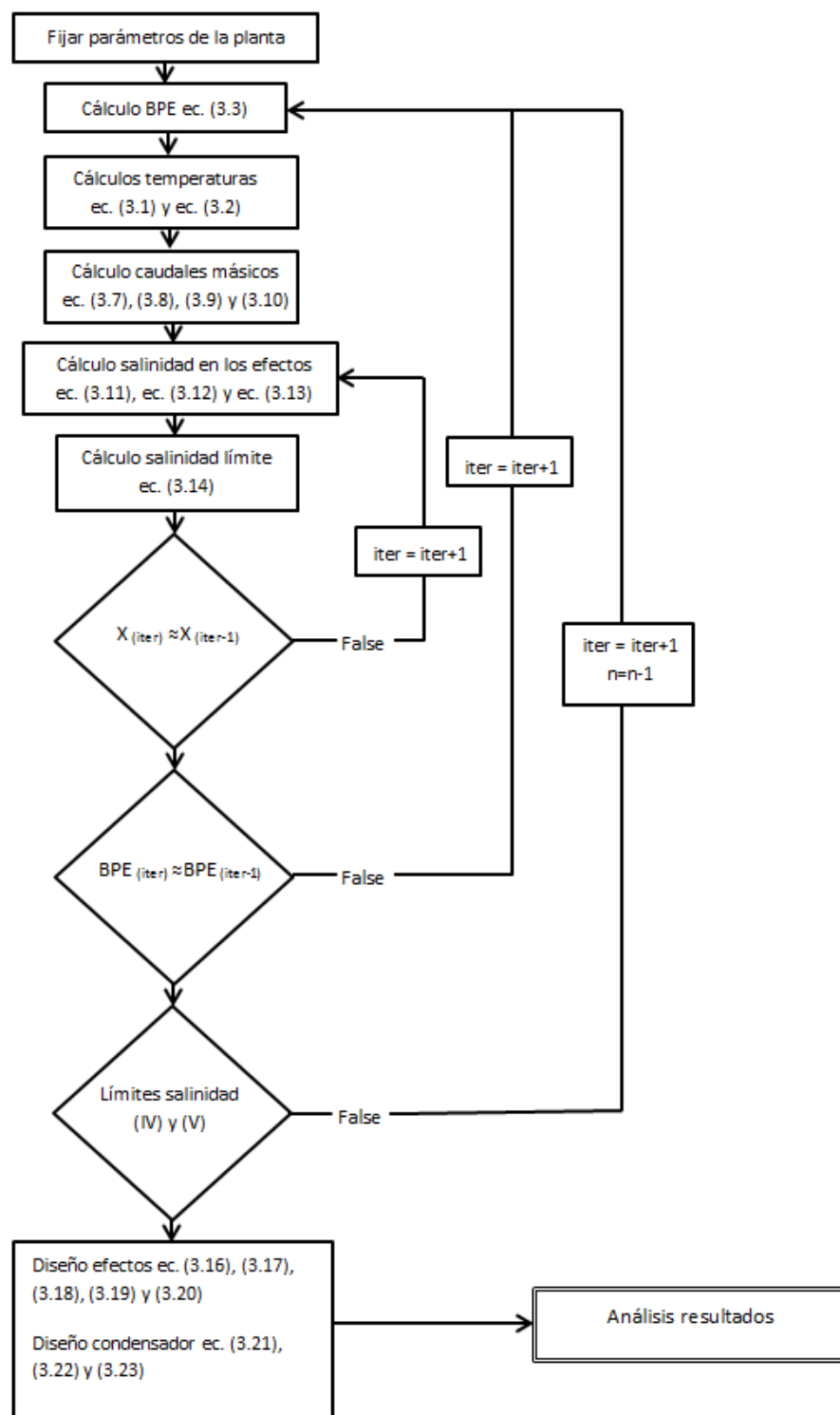


Figura 22: Diagrama de flujo del ciclo de desalinización



NOMENCLATURA

Δh_v	Entalpía de cambio de fase en el efecto
ΔT	Incremento de temperatura entre los efectos [K]
ΔT_e	Incremento de temperatura en el efecto [K]
ΔX	Factor de seguridad de salinidad [ppm]
ΔT_{ml}	Incremento de temperatura media logarítmica [K]
ε	Eficiencia de los efectos
A_c	Área de intercambio del condensador [m ²]
A_e	Área de intercambio de calor del efecto [m ²]
BPE	Elevación del punto de ebullición (Boiling Point Elevation) [K]
$C(T, X)$	Calor específico del agua [J/kg · K]
D_0	Diámetro interior de los tubos [m]
GOR	Gained Output Ratio
$h'(T)$	Entalpía de líquido saturado a la temperatura T [J/kg]
$h''(T)$	Entalpía de vapor saturado a la temperatura T [J/kg]
L_p	Longitud de las placas [m]
L_T	Longitud de los tubos [m]
\dot{m}_a	Caudal másico de alimentación del efecto [kg/s]
\dot{m}_d	Caudal másico de destilado del efecto [kg/s]
\dot{m}_s	Caudal másico de salmuera del efecto [kg/s]
\dot{m}_v	Caudal másico de vapor en el primer efecto [kg/s]
N_p	Número de placas en los efectos
N_{pt}	Número de pasos por tubo en el condensador
N_T	Número de tubos en el condensador
Q	Calor intercambiado en el efecto [W]
sA	Área específica del sistema [m ² /m ³ /d]
T	Temperatura del líquido en el interior del efecto [K]
T_a	Temperatura del agua de alimentación [K]
T_m	Temperatura del agua de mar [K]
T_s	Temperatura del vapor que entra en el primer efecto [K]
T_v	Temperatura del vapor del efecto [K]
U_c	Coficiente global de transferencia en el condensador [kW/m ² K]
U_e	Coficiente global de transferencia en el efecto [kW/m ² K]
w	Anchura de las placas [m]
X	Salinidad de la salmuera [ppm]
X_a	Salinidad del agua de alimentación [ppm]
$X_{CaSO_4,lim}$	Valor límite de salinidad de cristalización de la sal [ppm]



i *Número de efecto*
n *Último efecto*



DISEÑO Y ANÁLISIS TÉRMICO DE UNA PLANTA DESALINIZADORA SOLAR DE TORRE DE
CONCENTRACIÓN



4. Ciclo Rankine de vapor por unidad de masa

4.1. Ciclo Rankine

A la hora de hacer balances de energía en los distintos componentes del ciclo se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las pérdidas de calor que tienen lugar entre los componentes del sistema y su entorno se ignoran por motivo de simplicidad.
- Los efectos de las energías cinética y potencial se consideran despreciables.
- En el análisis de cada componente se supone que este opera en condiciones de estado estacionario.
- Se tomará como criterio de signos: el calor se considerará como positivo cuando sea transferido al sistema desde el entorno, y negativo cuando sea al contrario; el trabajo se considerará positivo cuando el fluido ceda energía a los componentes, y se considerará negativa cuando el fluido reciba energía [68]. Un esquema de este criterios se puede observar en la figura 23.

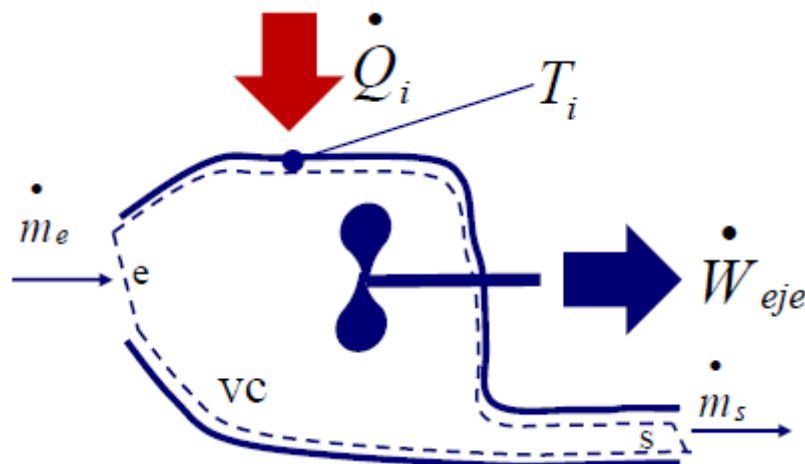


Figura 23: Criterio de signos [69]

- El ciclo se realizará por unidad de masa ya que desconocemos el caudal másico que circula por los componentes.
- Para la realización del ciclo se utilizará el programa Cyclepad, desarrollado por la Universidad de Northwestern, en Evanston, Illinois.

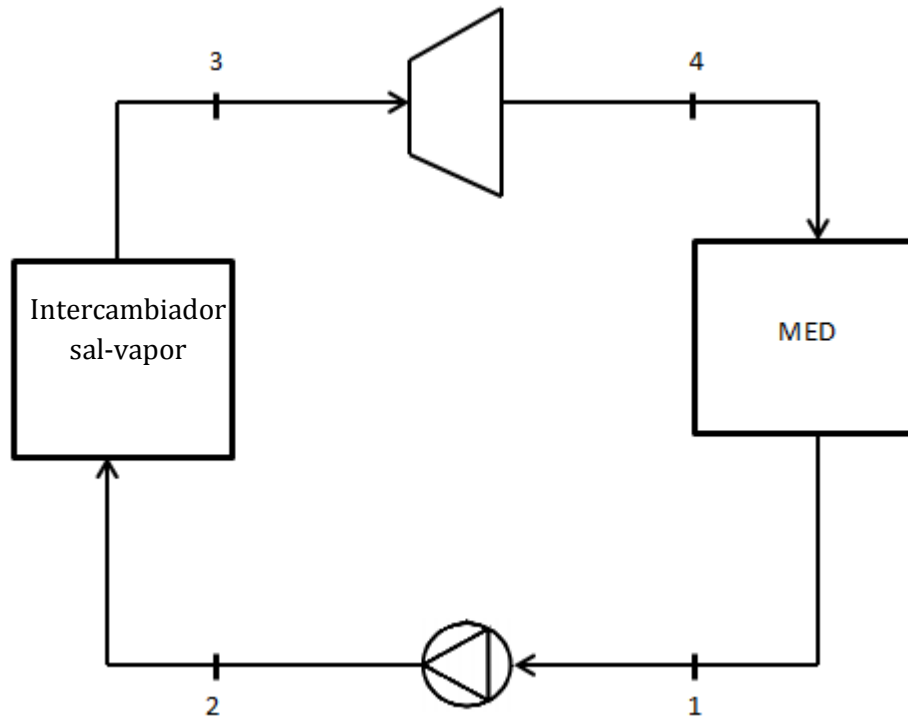


Figura 24: Esquema del ciclo Rankine. Elaboración propia.

El ciclo Rankine de vapor está formado por los siguientes componentes [70] (figura 24):

Bomba (1-2)

En el punto 1 el agua se encuentra en fase de líquido saturado. Esto se debe a que la bomba no tolera la entrada de vapor para su correcto funcionamiento. El líquido es bombeado a la salida del condensador (en nuestro ciclo los efectos) y se eleva su presión desde la presión de baja del ciclo hasta la de alta.

Se supondrá que la bomba trabaja en régimen adiabático, y se tomará un volumen de control que rodee la bomba. La bomba le transfiere energía al fluido, de modo que el balance de energía queda de la siguiente forma:

$$\text{Balance de energía : } \frac{\delta E_{VC}}{\delta t} = \dot{q} - \{-w_B\} + h_e - h_s$$

$$\text{Balance de masa: } h_e = h_s$$



$$w_B = h_2 - h_1 \quad (4.1)$$

Evaporador (2-3)

En nuestro ciclo el evaporador será un **intercambiador sal-vapor**. En él el agua recibe calor del fluido caliente, que en este caso es la sal, y aumenta su temperatura hasta la de saturación. El agua se transforma en vapor, y después se eleva su temperatura hasta llegar al punto 3, donde el fluido de trabajo se encuentra en fase de **vapor sobrecalentado**. Un intercambiador de calor no genera ni recibe trabajo, y el flujo de calor entra en el fluido de alimentación, de manera que considerando un volumen de control que incluya los tubos y elementos de la caldera entre los estados 2 y 3, los balances de energía y masa quedan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Balance de energía : } \frac{\delta E_{vc}}{\delta t} &= q_{IC} - \{w\} + h_e - h_s \\ \text{Balance de masa: } h_e &= h_s \end{aligned}$$

$$q_{IC} = h_3 - h_2 \quad (4.2)$$

Turbina (3-4)

El vapor generado en el intercambiador de calor en el estado 3, con presión y temperatura elevadas se expande a través de la turbina para producir trabajo, descargándose en el condensador (en nuestro ciclo en los efectos) a baja presión. Tomando como volumen de control la turbina:

$$\begin{aligned} \text{Balance de energía : } \frac{\delta E_{vc}}{\delta t} &= \dot{Q} - \{w_T\} + h_e - h_s \\ \text{Balance de masa: } h_e &= h_s \end{aligned}$$

$$w_T = h_3 - h_4 \quad (4.3)$$

Condensador (4-1)

En el condensador se transfiere calor del vapor al fluido de refrigeración que circula en un flujo separado. El vapor condensa y aumenta la temperatura del fluido de refrigeración. En el ciclo de la central el papel del condensador lo desempeñan los efectos, donde se introduce el vapor de la turbina, con el que se destila el agua, y sale un condensado sobrante que sigue circulando por el ciclo.

$$\text{Balance de energía: } \frac{\delta E_{VC}}{\delta t} = -q_{MED} - \{w\} + h_e - h_s$$
$$\text{Balance de masa: } h_e = h_s$$

$$q_{MED} = h_4 - h_1 \quad (4.4)$$

4.2. Cálculo del ciclo de vapor del proyecto

Para calcular el ciclo intermedio se tomarán las siguientes **hipótesis**:

- El rendimiento de la bomba es del 80% ($\eta_B = 0,8$).
- El rendimiento de la turbina de contrapresión es del 80% ($\eta_T = 0,8$).
- El punto 2' es la salida de la bomba suponiendo que fuera isentrópica ($\eta_B = 1$).
- El punto 4' es la salida de la turbina suponiendo que fuera isentrópica ($\eta_T = 1$).
- Suponemos que no hay pérdidas de presión en los intercambiadores de calor.
- A la entrada de la bomba tenemos líquido saturado.
- La salida de la turbina admite un título de vapor de hasta $x_4 = 0,9$, ya que una mayor cantidad de líquido podría dañar los álabes.
- La temperatura a la salida de la turbina T_4 es la misma que la de la entrada de la bomba T_1 , que hemos calculado en el ciclo de desalinización (T_s).
- Para el cálculo del ciclo utilizaremos las tablas de propiedades del agua y realizaremos interpolaciones lineales.

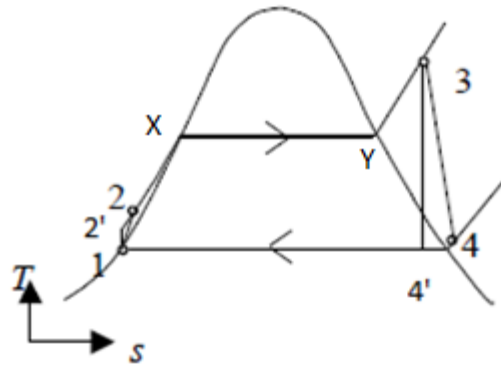


Figura 25: Representación del ciclo en el diagrama T-s. Basado en [71].

En la figura 25 se muestra una representación cualquiera del ciclo Rankine.

Obtenemos los puntos del ciclo:

Punto 1

La temperatura en el punto 1 es la misma que la del punto 4', ya que en el condensador no se consideran pérdidas.

$$T_1 = T_{4'} = T_S \quad (4.5)$$

Sabiendo que en el punto 1 el fluido de alimentación se encuentra en fase de líquido saturado. Por lo tanto, se pueden coger las propiedades directamente de las tablas.

$$P_1 = P_{4'} = P_{l,sat}(T_1) = P_{baja} \quad (4.6)$$

$$h_1 = h_{l,\text{sat}}(T_1) \quad (4.7)$$

$$s_1 = s_{l,\text{sat}}(T_1) \quad (4.8)$$



La figura 26 sirve para indicar las diferentes regiones del diagrama T-s.

Punto 2'

El punto 2' se encuentra a la presión de alta del ciclo, y a la misma entropía del punto 1. Por lo tanto se calcularán sus propiedades interpolando en las tablas de líquido subenfriado.

$$h_{2'} = h_1(s_1, P_{\text{alta}}) \quad (4.9)$$

Punto 2

Podemos calcular las condiciones del punto 2 a partir del rendimiento de la bomba.

$$h_2 = h_{2'} + \frac{h_{2'} - h_1}{\eta_B} \quad (4.10)$$

$$T_2 = T(P_{\text{alta}}, h_2) \quad (4.11)$$

Puntos X e Y

Los puntos X e Y limitan la transformación del agua de estado líquido a vapor.

$$T_X = T_Y = T_{\text{sat}}(P_{\text{alta}}) \quad (4.12)$$

Punto 4'

El punto 4' se colocará con un título de vapor de 0.9, que es el valor límite de operación de nuestra turbina.

$$s_{4'} = (1 - \chi_{4'}) \cdot s_{l,\text{sat}}(T_{4'}) + \chi_{4'} \cdot s_{v,\text{sat}}(T_{4'}) \quad (4.13)$$

Punto 3

En el punto 3 el agua se ha transformado completamente en vapor sobrecalentado. Se obtendrán las propiedades necesarias de las tablas, sabiendo que la entropía del punto 3 es la misma que la del 4', y que la presión es la de alta.

$$h_3 = h(s_{4'}, P_{\text{alta}}) \quad (4.14)$$

$$T_3 = T_{\text{máxima del ciclo}} = T(P_{\text{alta}}, s_{4'}) \quad (4.15)$$

Punto 4

Se pueden calcular las propiedades del punto 4 con el rendimiento de la turbina.

$$h_4 = h_3 + \eta_T(h_{4'} - h_3) \quad (4.16)$$

$$T_4 = T(h_4, P_{\text{baja}}) \quad (4.17)$$

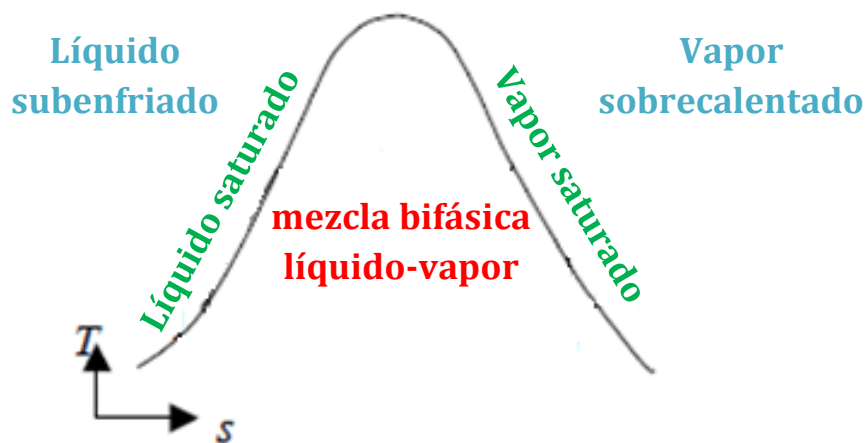


Figura 26: Estados del agua en el diagrama T-s

Por último, se calcula el rendimiento térmico del ciclo Rankine. El rendimiento del ciclo indica la cantidad de energía recibida por el fluido de trabajo en la caldera que se convierte en trabajo neto producido.



$$\eta_{\text{ciclo}} = \frac{w_T - w_B}{q_{\text{MED}}}$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.1), (4.3) y (4.4).

$$\eta_{\text{ciclo}} = \frac{h_3 - h_4 + h_1 - h_2}{h_4 - h_1} \quad (4.18)$$

Otro parámetro utilizado para describir el funcionamiento de una central es la relación de trabajos, definida como la relación entre el trabajo consumido por la bomba y el trabajo desarrollado por la turbina.

$$rw = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_4} \quad (4.19)$$



NOMENCLATURA

η_B	<i>Rendimiento isentrópico de la bomba</i>
η_{ciclo}	<i>Rendimiento térmico del ciclo de vapor</i>
η_T	<i>Rendimiento isentrópico de la turbina</i>
χ	<i>Título de vapor [$0 < \chi < 1$]</i>
E_{VC}	<i>Energía del volumen de control elegido [J]</i>
h	<i>Entalpía [J/kg]</i>
P	<i>Presión total [bar]</i>
rw	<i>Relación trabajos bomba/turbina</i>
s	<i>Entropía [J/kg · K]</i>
T	<i>Temperatura [K]</i>
T_S	<i>Temperatura del vapor generado en la turbina [K]</i>
q_{IC}	<i>Calor específico transferido en el intercambiador sal – vapor [J/kg]</i>
q_{MED}	<i>Calor específico transferido en los multi – efectos [J/kg]</i>
w_B	<i>Trabajo específico cedido por la bomba [J/kg]</i>
w_T	<i>Trabajo específico generado por la turbina [J/kg]</i>
1	<i>Punto 1 del ciclo(entrada de la bomba)</i>
2	<i>Punto 2 del ciclo(salida de la bomba)</i>
2'	<i>Salida isentrópica de la bomba ($\eta_B = 1$)</i>
3	<i>Punto 3 del ciclo (entrada de la turbina)</i>
4	<i>Punto 4 del ciclo (salida de la turbina)</i>
4'	<i>Salida isentrópica de la turbina ($\eta_T = 1$)</i>
e	<i>Entrada al volumen de control</i>
s	<i>Salida del volumen de control</i>
X	<i>Punto X (inicio transformación líquido vapor; $\chi = 0$)</i>
Y	<i>Punto Y (fin transformación líquido vapor; $\chi = 1$)</i>





5. Diseño del intercambiador sal- vapor

5.1. Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son aparatos que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evitan al mismo tiempo que se mezclen entre sí. El calor se transfiere por **convección** en cada fluido y **conducción** a través de la pared que los separa.

Existen diferentes tipos de intercambiadores de calor para cubrir las distintas aplicaciones requeridas:

- El intercambiador de doble tubo o tubos concéntricos es el modelo más simple. Uno de los dos fluidos pasa por el tubo pequeño, mientras que el otro lo hace por el espacio anular entre los dos tubos.

Dentro del intercambiador hay dos tipos de disposición de flujo: en **flujo paralelo** los dos fluidos entran en el intercambiador por el mismo extremo y se mueven en la misma dirección, mientras que en el **contraflujo** los fluidos entran en el intercambiador por extremos opuestos y fluyen en direcciones opuestas.

En la figura 27 se puede ver el esquema de funcionamiento de este tipo de intercambiadores.

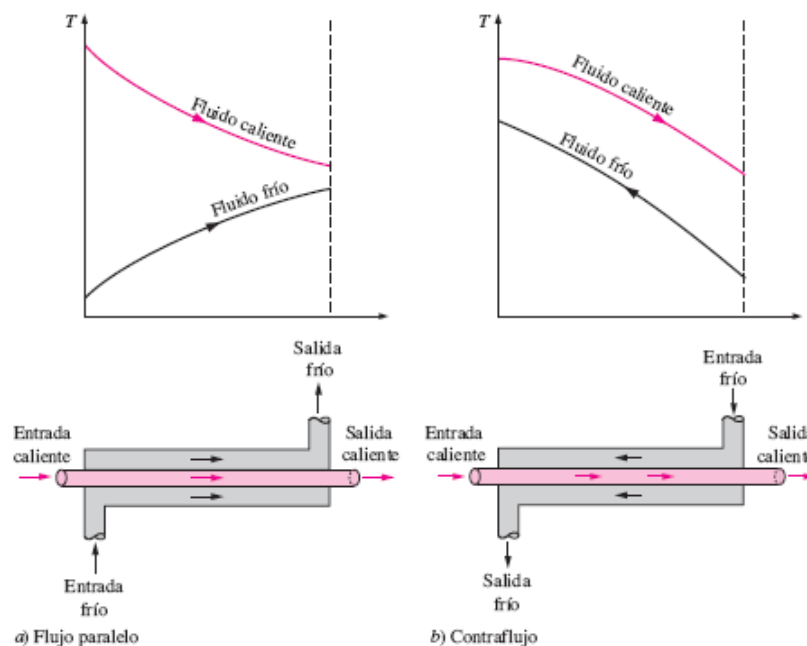


Figura 27: Intercambiador de calor de tubos concéntricos [72]

- Otro tipo de intercambiador de calor es el intercambiador compacto, diseñado específicamente para lograr una gran área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen. Un intercambiador se considera compacto cuando la razón entre el área superficial de intercambio de calor y su volumen, llamado densidad de área $\beta > 700\text{m}^2/\text{m}^3$. Los pasajes a través de los cuales pasa el flujo son muy pequeños, por lo que el flujo puede considerarse como laminar. Debido al gran número de aplicaciones, el número de Prandtl de los fluidos varía entre $0.1 < \text{Pr} < \infty$, lo que cubre un amplio rango, desde gases hasta líquidos de alta viscosidad como aceites de automóvil. [73]

La gran área superficial en los intercambiadores compactos se obtiene sujetando placas delgadas o aletas corrugadas con poco espacio entre sí a las paredes que separan los dos fluidos. Son de uso común en la transferencia de calor de gas hacia gas y de gas hacia líquido, para compensar el bajo coeficiente de transferencia de calor asociado con el flujo de gases. En los intercambiadores compactos los dos fluidos suelen moverse de manera perpendicular entre sí y a esa configuración se le conoce como **flujo cruzado**, que se clasifica en flujo *no mezclado* o *mezclado*, en función de si las aletas fuerzan al fluido a moverse por un espaciamiento particular entre ellas impiden su movimiento en la dirección transversal; o si el fluido si tiene libertad para moverse en la dirección transversal.

Algunos ejemplos de intercambiador compacto son los radiadores de automóviles, los intercambiadores de cerámica de vidrio de las turbinas de gas, el regenerador de motor Stirling y el pulmón humano. Una imagen de uno de estos intercambiadores aparece en la figura 28.



Figura 28: Intercambiador de calor compacto de aluminio para calefacción de automóvil [74]

- En los intercambiadores regenerativos el intercambio de calor se relaciona con el paso alternativo de las corrientes de fluido caliente y frío a través de la misma área de flujo. Los del tipo **estático** consisten en una masa porosa que tiene una gran capacidad de almacenamiento de calor. El calor se transfiere hacia la matriz del regenerador durante el flujo del mismo, y de la matriz al fluido frío durante el paso de éste, actuando la matriz como medio de almacenamiento temporal del calor.

Los del tipo dinámico constan de un tambor giratorio y se establece un flujo continuo del fluido caliente y del frío a través de partes diferentes del tambor, de modo que diversas partes pasan periódicamente a través de la corriente caliente, almacenando calor, y después a través de la corriente fría, rechazando el calor almacenado.

- Los intercambiadores de placas (figura 29) constan de una serie de placas con pasos corrugados y aplastados para el flujo. Los fluidos caliente y frío fluyen en pasos alternados, de modo que cada corriente de fluido frío queda rodeado por dos corrientes de fluido caliente. Este tipo de intercambiadores resultan muy apropiados cuando ambas corrientes son líquidos más o menos de la misma presión.

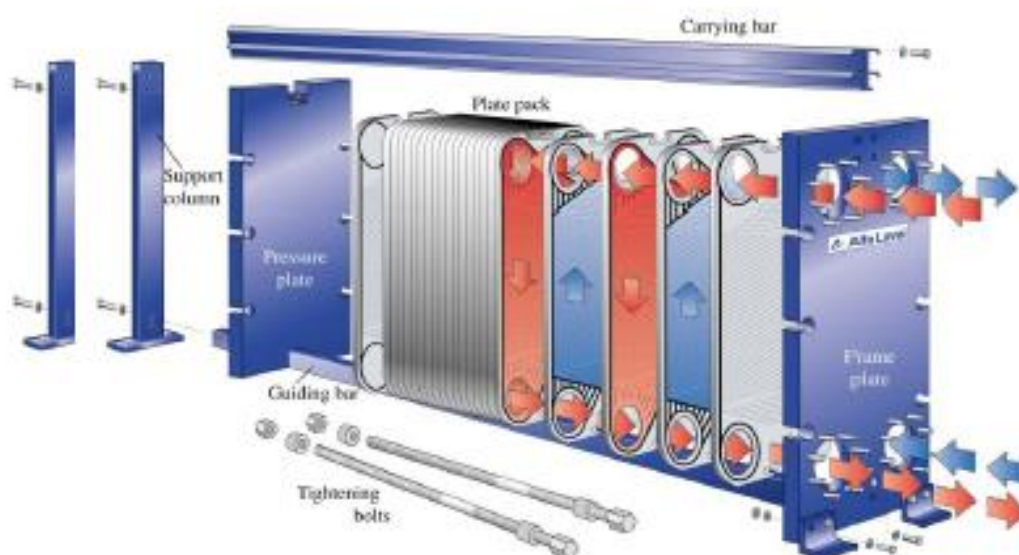


Figura 29: Intercambiador de placas [75]



- El tipo más común de intercambiador es el de tubo-carcasa. Consiste un gran número de tubos contenidos en una carcasa cilíndrica con su eje paralelo a los ejes de los tubos. La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por dentro de los tubos y el otro por fuera de éstos, circulando por la carcasa. Ambos fluidos se encuentran separados en los extremos del intercambiador por unas placas soldadas para proporcionar el sello adecuado. Cuando ambos fluidos presentan una gran diferencia entre sus presiones, el de mayor presión se hace circular a través de los tubos, debido a que es más fácil fabricar los tubos para que aguanten la presión a un coste más bajo [76].

A lo largo de la carcasa se colocan bafles o desviadores: paneles agujereados empleados para soportar el peso de los tubos y dirigir el flujo con la mayor eficiencia posible, mejorando la transferencia de calor. Al aumentar el número de bafles también aumenta la pérdida de carga del fluido que circula por la carcasa.

Hay una gran variedad de intercambiadores de tubo-carcasa en el mercado. La Asociación de Fabricantes de Intercambiadores de Calor Tubulares, conocida por las siglas TEMA en inglés, es la asociación comercial de los principales fabricantes de intercambiadores de tubo y carcasa, y han sido los grandes pioneros en la investigación y desarrollo de este tipo de intercambiadores en los últimos 60 años. TEMA emplea un código de tres letras para especificar la geometría del cambiador y el tipo de carcasa, que se ha recogido en la figura 30.

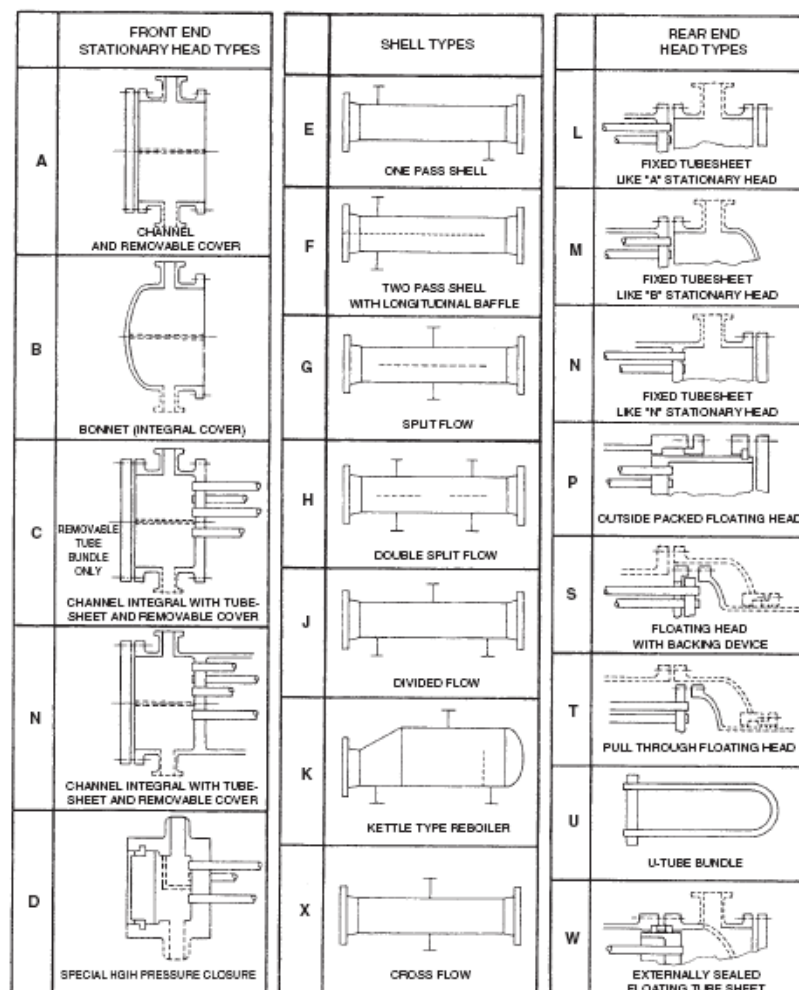


Figura 30: Designaciones de TEMA para intercambiadores de tubo-carcasa [77]

Cuando el fluido de la carcasa va a transformarse de líquido en vapor, el intercambiador más adecuado es el **"Kettle"**. Consiste en una carcasa tipo K montada horizontalmente y un haz de tubos colocados en forma de U en su interior. El fluido que circula por la carcasa entra en el evaporador fluye hacia arriba a través del haz de tubos, y la ebullición se llevará a cabo en la superficie exterior de los tubos. Se produce una separación entre vapor y líquido, y el vapor fluye por encima de los tubos, por la cámara de separación de vapor, mientras que el líquido fluye hacia un rebosadero, donde sale del evaporador como producto de deshecho (figura 31).

El bajo régimen de velocidad de circulación, su disposición horizontal y el flujo de recuperación de vapor hace que sean muy fiables incluso para muy bajas y altas presiones, condiciones en las que otros evaporadores tienden a sufrir problemas operativos. Los Kettle pueden operar eficientemente con pequeños incrementos de

temperatura, ya que pueden obtenerse grandes flujos de calor incrementando el espaciado entre tubos [78]. Sin embargo, el bajo régimen de circulación los hacen más susceptibles al ensuciamiento y obstrucción, y las carcassas tipo K son relativamente caras [79].

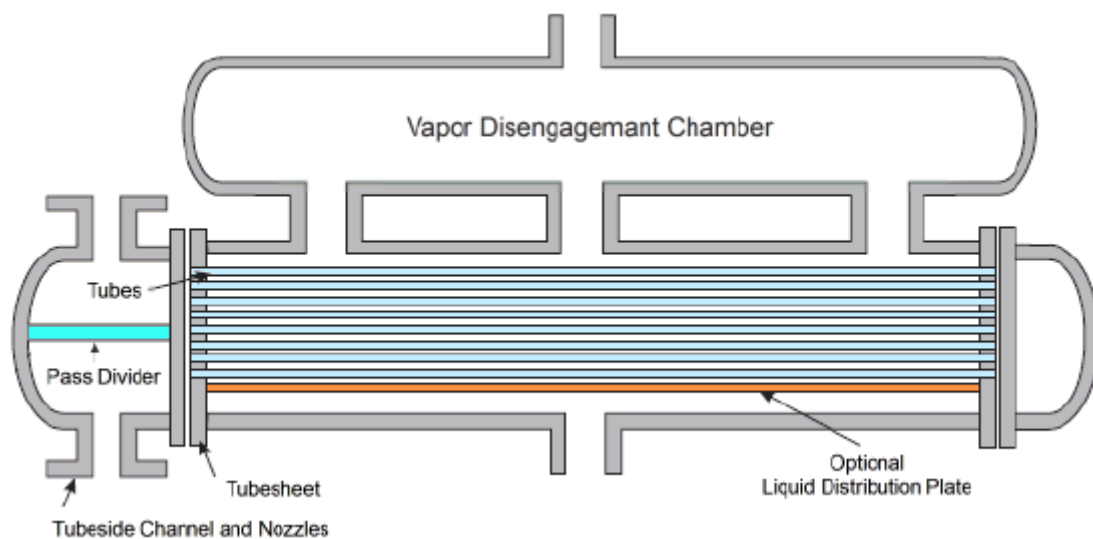


Figura 31: Intercambiador tubo-carcasa "kettle" [80]

5.2. Diseño del intercambiador

Para el diseño del intercambiador, se tomarán las siguientes **hipótesis**:

- El intercambiador opera en estado estacionario.
- Las pérdidas en el entorno son despreciables.
- Las propiedades de los fluidos se considerarán constantes dentro del intercambiador.
- La temperatura de alta del ciclo de sal será de 560°C. La sal fundida no soporta temperaturas mayores, ya que los nitratos comienzan a descomponerse.

- La temperatura de baja debe estar por encima del punto de fusión de la sal unos 45°C, por lo que se fijará en 290°C.
- El diámetro de los tubos del intercambiador debe ser suficientemente pequeño para permitir el aumento de la densidad de superficie de transferencia de calor. La construcción de los tubos se realiza en pulgadas, tomando valores enteros para la construcción de los distintos modelos (1", 2", etc).
- La velocidad del fluido que pasa por los tubos no puede ser demasiado pequeña, ya que la deposición de partículas aumentarían la resistencia de ensuciamiento, ni demasiado grande, que provocaría una gran corrosión y erosión. Por ello deberá quedar dentro de los siguientes límites:
 $1 \text{ m/s} < v_{sal} < 2 \text{ m/s}$ [81].

En el intercambiador se calentará el flujo de agua para obtener el vapor necesario, a partir del flujo caliente de sal fundida. Esta sal está compuesta por una mezcla binaria no eutéctica de 60% de nitrato de sodio (NaNO_3) y 40% nitrato potásico (KNO_3) [52]

En primer lugar, conociendo las temperaturas de los flujos se calcula la eficiencia del intercambiador:

$$\varepsilon = \frac{T_e - T_s}{T_e - t_e} \quad (5.1)$$

Este parámetro se define como el ratio entre el flujo de calor que es transferido y el flujo máximo posible. Para que un intercambiador opere correctamente, el valor de la eficiencia debe estar aproximadamente entre 0,7~ ε ~0,9.

Para el diseño del intercambiador de calor se utilizará el método de la Diferencia Media Logarítmica de Temperatura (LMTD). Este método de diseño se basa en las siguientes suposiciones:

- La diferencia de temperatura entre los fluidos frío y caliente varía a lo largo del intercambiador de calor.

- Existe una *diferencia de temperatura media* ΔT_m , de manera que la potencia calorífica intercambiada $\dot{Q} = UA \Delta T_m$.

Tomando un intercambiador de doble tubo y flujo paralelo (figura 32), se puede observar que la diferencia de temperaturas es muy grande a la entrada del intercambiador, y disminuye de forma exponencial hasta la salida de este.

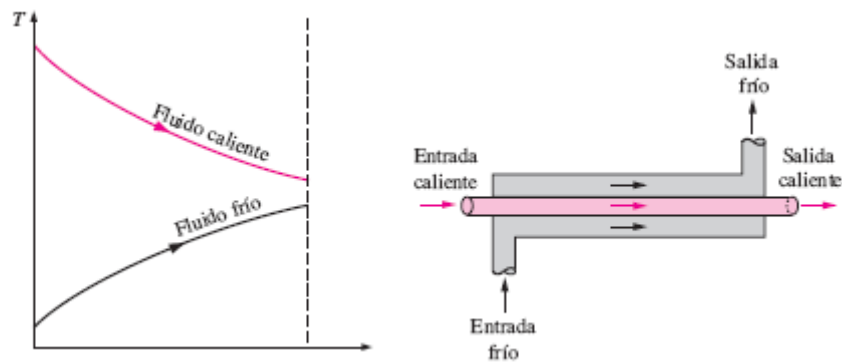


Figura 32: Intercambiador doble tubo y flujo paralelo [72]

Suponiendo que cualquier transferencia de calor ocurre solo entre los dos fluidos, y se desprecian las variaciones de energía cinética y potencial, un balance de energía en cada fluido, en una sección diferencial del intercambiador, se puede expresar como:

$$\delta \dot{Q} = -\dot{m}_c C_{p_c} \delta T \quad (5.2)$$

$$\delta \dot{Q} = \dot{m}_f C_{p_f} \delta t \quad (5.3)$$

Es decir, el calor cedido por el fluido caliente es igual al absorbido por el fluido frío.



Si despejamos y restamos ambas ecuaciones:

$$\delta T - \delta t = \delta(T - t) = -\delta \dot{Q} \left(\frac{1}{\dot{m}_c C_{p_c}} + \frac{1}{\dot{m}_f C_{p_f}} \right)$$

Además, sabemos que:

$$\delta \dot{Q} = U(T - t) \delta A \quad (5.4)$$

Y sustituyendo e integrando, se obtiene que:

$$\dot{Q} = UA \frac{(T_e - t_e) - (T_s - t_s)}{\ln \left(\frac{T_e - t_e}{T_s - t_s} \right)}$$

La diferencia de temperatura promedio es la conocida como diferencia media logarítmica de temperatura, y la ecuación queda de la forma:

$$\dot{Q}_{FP} = UA \Delta T_{ml} \quad (5.5)$$

Como el intercambiador de la central a diseñar no opera en las condiciones descritas, es necesario aplicar un factor de corrección F, que depende de la geometría del intercambiador, y de las temperaturas de entrada y salida de los dos flujos, y es una medida de la desviación de la LMTD con respecto al caso de contraflujo. Este factor de corrección debe estar en el intervalo $0.8 < F < 1$ para que el intercambiador funcione correctamente. El número de carcassas necesarias para que el factor de corrección entre en este intervalo puede calcularse con las siguientes correlaciones: [82]

$$R = \frac{t_e - t_s}{T_s - T_e} \quad (5.6)$$

$$P = \frac{T_s - T_e}{t_e - T_e} \quad (5.7)$$



Para $R \neq 1$:

$$\alpha = \left(\frac{1 - RP}{1 - P} \right)^{1/N_c} \quad (5.8)$$

$$S = \frac{\alpha - 1}{\alpha - R} \quad (5.9)$$

$$F = \frac{\sqrt{R^2 + 1} \ln \left(\frac{1 - S}{1 - RS} \right)}{(R - 1) \ln \left[\frac{2 - S(R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S(R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})} \right]} \quad (5.10)$$

Para $R=1$:

$$S = \frac{P}{N_c - (N_c - 1)P} \quad (5.11)$$

$$F = \frac{S\sqrt{2}}{(1 - S) \ln \left[\frac{2 - S(2 - \sqrt{2})}{2 - S(2 + \sqrt{2})} \right]} \quad (5.12)$$

Debe iterarse, aumentando el número de carcassas hasta que el valor del factor de corrección sea aceptable. Así, concluimos que el calor intercambiado

$$\dot{Q} = UA F \Delta T_{ml} \quad (5.13)$$



Para calcular el área de intercambio a partir de la ecuación (6.13), es necesario obtener la potencia calorífica transferida y el coeficiente global de transferencia de calor, siguiendo los siguientes pasos:

Potencia calorífica

El caudal másico que circula por cada tubo puede calcularse como:

$$\dot{m}_{sal} = \rho_{sal} \cdot Q_{sal} \quad (5.14)$$

Donde el caudal volumétrico puede hallarse a partir de la velocidad

$$Q_{sal} = v_{sal} \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (5.15)$$

Se tomarán las propiedades de la sal fundida a la temperatura media entre la entrada y la salida de los tubos $T_{p,sal} = \frac{T_e - T_s}{2}$ [83]:

$$\rho_{sal} = 2090 - 0.636 \cdot T_{p,sal} \quad (5.16)$$

$$C_{p,sal} = 1443 + 0.172 \cdot T_{p,sal} \quad (5.17)$$

$$\mu_{sal} = 22.714 - 0.12 \cdot T_{p,sal} + 2.281 \cdot 10^{-4} \cdot (T_{p,sal})^2 - 1.474 \cdot 10^{-7} \cdot (T_{p,sal})^3 \quad (5.18)$$

$$k_{sal} = 0.443 + 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot T_{p,sal} \quad (5.19)$$

Con las propiedades de la sal ya se puede obtener la potencia calorífica, con el caudal másico total que circula por los tubos.

$$\dot{Q} = \frac{N_t}{N_p} \dot{m}_{sal} \cdot C_{p,sal} \cdot (T_e - T_s) \quad (5.20)$$



Coefficiente de transferencia de calor por convección

El número de Reynolds es el número adimensional más utilizado en la mecánica de fluidos, y compara la fuerza inercial con la fuerza viscosa en un fluido.

$$Re = \frac{\rho v L_c}{\mu} \quad (5.21)$$

En este caso la longitud característica será el diámetro interno. Supondremos que el Reynolds va a ser lo suficientemente grande, y consideraremos el flujo interno como **flujo turbulento completamente desarrollado**.

El número de Prandtl relaciona la difusión viscosa con la difusión térmica:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (5.22)$$

El factor de fricción del flujo interna se calcula mediante **Petukov**:

$$f = (0.79 \ln(Re_{Di}) - 1.64)^{-2} \quad (5.23)$$

Y por último, calculamos el número de Nusselt, mediante la correlación de **Gnielinski**. El número de Nusselt relaciona la transferencia de calor por convección con la de conducción, y a partir de él se puede calcular directamente el coeficiente de transferencia de calor.

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re_D - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (5.24)$$

Coefficiente de convección de la carcasa

Es posible calcular el gasto másico que circula por la carcasa. Dado que va a evaporarse agua dentro del intercambiador, es preciso dividir este en tres partes, y calcular las características de cada una de ellas: [84], [85]



PRECALENTADOR

En el precalentador, el agua entra en estado de líquido subenfriado, nada más salir de la bomba. Acorde con la **ley de Kelvin-Planck, o Segundo Principio de la Termodinámica**, el agua recibe el calor del flujo caliente de sal, incrementando su temperatura. A la salida del precalentador el agua debe de haber alcanzado la temperatura de saturación a la presión de alta.

EVAPORADOR

A la temperatura de saturación, el agua comenzará su transformación en vapor. Dentro del evaporador el incremento de temperatura puede considerarse despreciable, debido a que toda la potencia calorífica suministrada es utilizada en el cambio de fase. Por lo tanto, por simplicidad de diseño, también podemos considerar que el coeficiente de convección del agua es infinito.

SOBRECALENTADOR

Su principio operativo es similar al del precalentador. El agua, que sale del evaporador a la temperatura de saturación, sigue recibiendo potencia calorífica, y sigue incrementando su temperatura, llegando a la fase de vapor sobrecalentado.

La representación de las tres partes en el diagrama T-s se muestra en la figura 33.



Figura 33: Zonas del intercambiador en el diagrama T-s

Para calcular el gasto másico que circula por la carcasa deben hallarse las propiedades del fluido a la temperatura media de cada una de las partes del intercambiador. Puede emplearse la potencia calorífica calculada en la ecuación (5.20).

$$\dot{m}_{agua} = \frac{\dot{Q}}{C_{p,liq}(t_{sat} - t_e) + \Delta h_v + C_{p,vapor}(t_s - t_{sat})} \quad (5.25)$$

Para calcular el lado de la carcasa utilizaremos el **método Kern**. Este método no se utiliza hoy en día para el diseño de intercambiadores, ya que no tiene en cuenta todas las características geométricas de la carcasa. Sin embargo, sí que puede utilizarse para un pre-diseño del intercambiador, que será suficiente para este proyecto.

Dado que el flujo atraviesa un haz de tubos, ha de **calcularse un diámetro equivalente y una superficie efectiva para calcular el Reynolds**, que dependerán de la disposición de los tubos, mostrada en la figura 34.

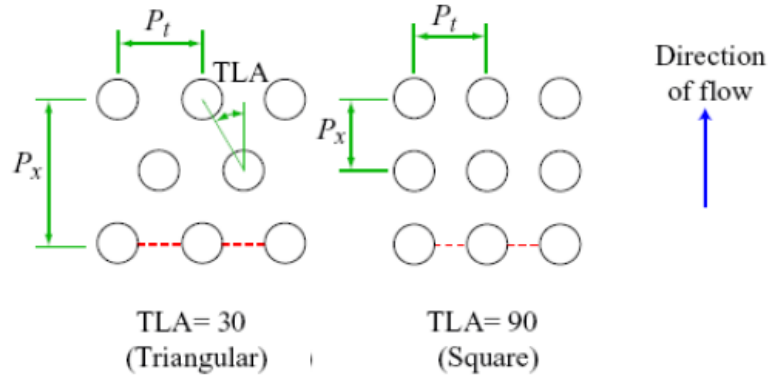


Figura 34: Esquema de disposición de los tubos en el intercambiador [75]

Algunas reglas prácticas para diseñar la configuración de los tubos son: [79]

- La distancia entre tubos (P_t) puede definirse como 1.25 veces el diámetro exterior de estos. Una separación demasiado pequeña supondría una alta pérdida de carga en el fluido que circula por la carcasa, mientras que si los tubos están demasiado alejados la transferencia de calor disminuiría.
- El diámetro de la carcasa debe ser tal que pueda albergar todos los tubos. Utilizaremos la disposición cuadrada de los tubos, y su diámetro puede obtenerse de la ecuación

$$D_s = 2 P_t \sqrt{\frac{N_t}{\pi}} \quad (5.26)$$

$$D_e = \frac{4 \left(P_t^2 - \frac{\pi D_0^2}{4} \right)}{\pi D_0} \quad (5.27)$$

$$S_s = \frac{D_s}{P_t} (P_t - D_0) L_b \quad (5.28)$$



Donde D_s es el diámetro de la carcasa y L_b la distancia entre bafles.

Ahora se puede calcular el Reynolds, y con ayuda de las correlaciones de Kern, el coeficiente de convección del agua. Utilizaremos los valores de las propiedades del agua para el valor de temperatura media del intercambiador.

$$Re_{agua} = \frac{\dot{m}_{carcasa} D_e}{S_s \mu_{agua}} \quad (5.29)$$

$$Nu_{agua} = 0.36 Re_{agua}^{0.55} Pr_{agua}^{1/3} \quad (5.30)$$

Donde el número de Prandtl y el coeficiente de convección se calculan con las ecuaciones (6.22) y (6.24).

Coeficiente global de transferencia de calor

Es necesario calcular la resistencia térmica total del intercambiador. Dado que no sabemos la longitud de tubo necesaria, adaptaremos la expresión multiplicando por el área exterior de los tubos.

$$U = \left(\frac{1}{h_{agua}} + \frac{D_0}{D_i h_{sal}} + \frac{D_0 \ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right)}{2k_T} \right)^{-1} \quad (5.31)$$

En el evaporador, al considerar el coeficiente de convección infinito el término de la resistencia de convección del agua puede despreciarse.



Longitud de los tubos

A partir de la ecuación (6.13) se obtiene el área de intercambio, y con ella, la longitud de los tubos necesaria.

$$L_T = \frac{A}{\pi D_0 N_T N_P} \quad (5.32)$$

Los últimos parámetros que quedan por calcular son la longitud de la carcasa y el número de baffles, así como las pérdidas de carga.

$$L_s = \frac{L_T}{N_C} \quad (5.33)$$

$$N_{baffles} = \frac{L_s}{L_b} \quad (5.34)$$

Una vez diseñado el intercambiador de calor ([62], [86], [87]) se debe diseñar el último subsistema, el subsistema receptor, formado por la torre y el campo de heliostatos.



NOMENCLATURA

α	<i>Parámetro utilizado para calcular el factor de corrección LMTD, definido en la ec. (6.8)</i>
Δh_v	<i>Entalpía de cambio de fase [J/kg]</i>
ΔT_{ml}	<i>Diferencia media logarítmica de temperatura [K]</i>
ε	<i>Eficiencia del intercambiador, definida en la ec. (6.1)</i>
μ	<i>Viscosidad dinámica del fluido [Pa · s]</i>
A	<i>Área de intercambio [m²]</i>
C_p	<i>Calor específico del fluido [J/kgK]</i>
D_0	<i>Diámetro externo de los tubos [m]</i>
D_e	<i>Diámetro efectivo [m]</i>
D_i	<i>Diámetro interno de los tubos [m]</i>
D_s	<i>Diámetro de la carcasa [m]</i>
F	<i>Factor de corrección de LMTD</i>
f	<i>Factor de fricción de Petukov</i>
h	<i>Coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m²K]</i>
k	<i>Conductividad del fluido [W/mK]</i>
k_T	<i>Conductividad del material de los tubos [W/mK]</i>
L_b	<i>Distancia entre baffles [m]</i>
L_c	<i>Longitud característica [m]</i>
L_s	<i>Longitud de la carcasa [m]</i>
L_T	<i>Longitud de los tubos [m]</i>
\dot{m}	<i>Caudal másico [kg/s]</i>
$N_{baffles}$	<i>Número de baffles</i>
N_C	<i>Número de pasos por carcasa</i>
N_P	<i>Número de pasos por tubo</i>
N_T	<i>Número de tubos</i>
P	<i>Parámetro utilizado para calcular el factor de corrección LMTD, definido en la ec. (6.7)</i>
P_t	<i>Distancia entre centros de los tubos [m]</i>
Q	<i>Caudal volumétrico [kg/s]</i>
\dot{Q}	<i>Potencia calorífica intercambiada [W]</i>
\dot{Q}_{FP}	<i>Potencia calorífica intercambiada en flujo paralelo [W]</i>
R	<i>Parámetro utilizado para calcular el factor de corrección LMTD, definido en la ec. (6.6)</i>
S	<i>Parámetro utilizado para calcular el factor de corrección LMTD, definido en la ec. (6.9)</i>
S_s	<i>Superficie efectiva [m]</i>



T_e	<i>Temperatura de entrada del flujo de sal [°C]</i>
T_s	<i>Temperatura de salida del flujo de sal [°C]</i>
t_e	<i>Temperatura de entrada del flujo de agua [°C]</i>
t_s	<i>Temperatura de salida del flujo de vapor [°C]</i>
T_p	<i>Temperatura media para las propiedades del fluido [°C]</i>
t_{sat}	<i>Temperatura de saturación del agua [°C]</i>
U	<i>Coeficiente global de transferencia de calor [W/m^2K]</i>
v	<i>Velocidad del fluido [m/s]</i>
<i>agua</i>	<i>Fluido que circula por la carcasa</i>
<i>sal</i>	<i>Fluido que circula por los tubos</i>
Nu	<i>Número de Nusselt</i>
Pr	<i>Número de Prandtl</i>
Re	<i>Número de Reynolds</i>





6. Subsistema receptor

6.1. Ecuaciones

El subsistema receptor consta de dos partes: el campo de heliostatos, y la torre de concentración. Los heliostatos están compuestos de espejos planos que concentran la radiación en el receptor. El receptor está compuesto de metales estables a altas temperaturas, y el calor se recoge con un fluido de trabajo que puede ser agua, sal fundida, sodio líquido o aire. En las torres construidas más recientemente se está utilizando la sal, ya que no es inflamable, no es tóxica, y almacena mejor el calor que el agua [88].

Un esquema de funcionamiento del subsistema receptor se puede ver en la figura 35.

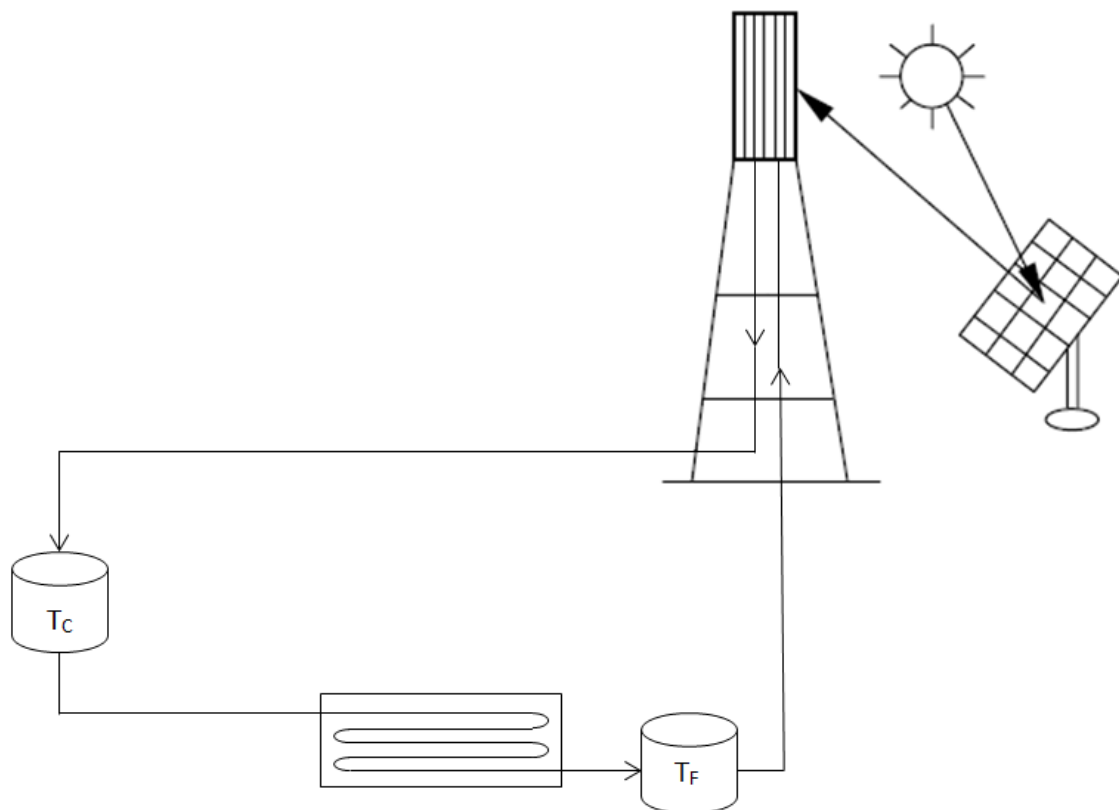


Figura 35: Esquema de la torre receptora y ciclo de sal. Elaboración propia.

El diseño del campo de heliostatos es una tarea esencial en el proceso de optimización de una torre solar. La distribución de estos se realiza utilizando diferentes modelos matemáticos, para una torre con una altura dada ubicada en cualquier lugar. Para dimensionarlo se requieren los siguientes parámetros:

- Potencia de la central
- Radiación solar directa
- Altura de la torre receptora
- Geometría del receptor
- Área de los heliostatos

El primer anillo se coloca aproximadamente a la mitad de la altura de la torre [89], porque si estuviera más próximo a ésta los heliostatos no podrían reflejar la radiación correctamente y su eficiencia sería muy baja. A partir de ahí los radios van incrementándose según la ecuación: [14]

$$\Delta R = \sqrt{A_h}(1.25 + i/20) \quad (6.1)$$

Además, cada uno de los anillos tiene un número de heliostatos regido por las siguientes ecuaciones:

$$NH(1) = 2\pi R(1)/1.5\sqrt{A_h} \quad (6.2)$$

para el primer anillo y

$$NH(i) = 2\pi R(i)/\sqrt{A_h}(1.5 + i/20) \quad (6.3)$$

para el resto.

Además, la separación radial entre heliostatos puede calcularse como

$$\Delta L(i) = 2\pi R(i)/NH(i) \quad (6.4)$$

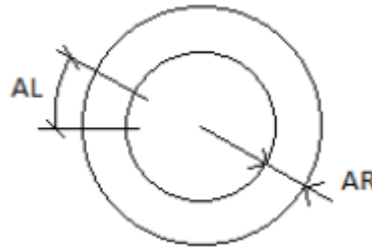


Figura 36: Separación entre anillos y entre espejos [14]

Punto de diseño

Para evaluar la energía que los heliostatos son capaces de transferir al receptor, es necesario elegir un punto de diseño. Este será un día del año a una hora determinada. Se elegirá un día de primavera, donde la radiación emitida por el Sol toma un valor medio, a las 12 del mediodía.

Movimiento aparente del Sol

El Sol es una esfera de materia gaseosa caliente con un diámetro de 1.39×10^9 m. Se encuentra aproximadamente a unos 1.5×10^8 km de la Tierra, por lo que la radiación tarda 8 minutos y 20 segundos en alcanzar el planeta. Observado desde la Tierra, el disco solar forma un ángulo de $32'$, lo que es importante en las tecnologías de concentración, ya que el Sol no puede considerarse como una fuente fija, e incluso este pequeño ángulo es significativo en el análisis del comportamiento del colector (figura 37).

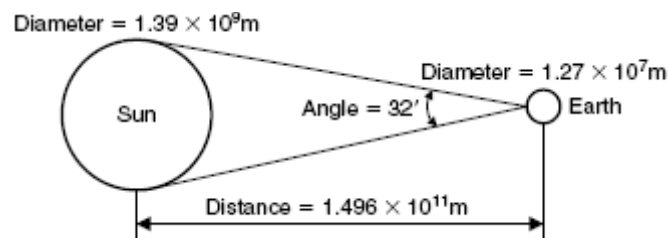


Figura 37: Relación Tierra-Sol [1]

Ángulos Tierra-Sol [90]

- **Ángulo horario ω** , que describe la rotación de la Tierra sobre su eje polar. El ángulo horario es la distancia angular entre el meridiano del observador y el meridiano cuyo plano contiene el Sol, es decir, el meridiano paralelo a los rayos del Sol incidentes.

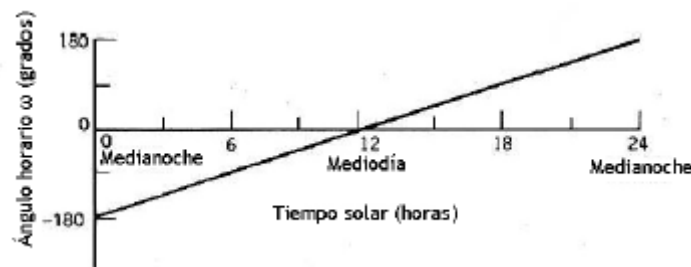


Figura 38: Variación del ángulo horario a lo largo del día [90]

El ángulo horario puede definirse a partir de la ecuación (6.5).

$$\omega = 15 (AST - 12) \quad (6.5)$$

y varía según lo que se muestra en la figura 38.

- **Ángulo de declinación δ** , definido entre la línea imaginaria trazada entre el centro de la Tierra y el Sol y el plano ecuatorial de la Tierra. Puede observarse en la figura 39.

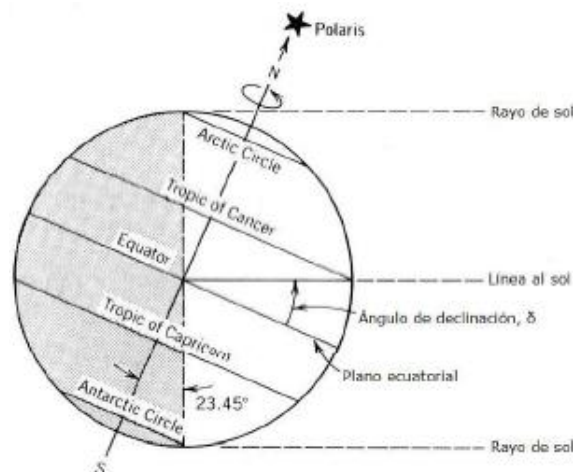


Figura 39: Ángulo de declinación [90]

El ángulo de declinación puede calcularse como:

$$\delta = \sin^{-1}\{0.39795 \cos[0.98563 (N - 173)]\} \quad (6.6)$$

donde N es el número de día del año, dado en la tabla 2.

Tabla 2

Conversión Fecha-Número día

Mes	Número de día, N
Enero	d
Febrero	d+31
Marzo	d+59 +1 si es bisiesto
Abril	d+90 +1 si es bisiesto
Mayo	d+120 +1 si es bisiesto
Junio	d+151 +1 si es bisiesto
Julio	d+181 +1 si es bisiesto
Agosto	d+212 +1 si es bisiesto
Septiembre	d+243 +1 si es bisiesto
Octubre	d+273 +1 si es bisiesto
Noviembre	d+304 +1 si es bisiesto
Diciembre	d+334 +1 si es bisiesto

- **Ángulo de latitud ϕ** , es el ángulo definida entre una línea trazada desde un punto de la superficie al centro de la Tierra y el plano ecuatorial. La intersección del plano ecuatorial con la superficie de la Tierra forma el Ecuador, y es designado con un ángulo de latitud de 0° . El eje de rotación interseca con la superficie a 90° en el Polo Norte y a -90° en el Polo Sur. El ángulo de latitud así como otros ángulos se representan en la figura 40.

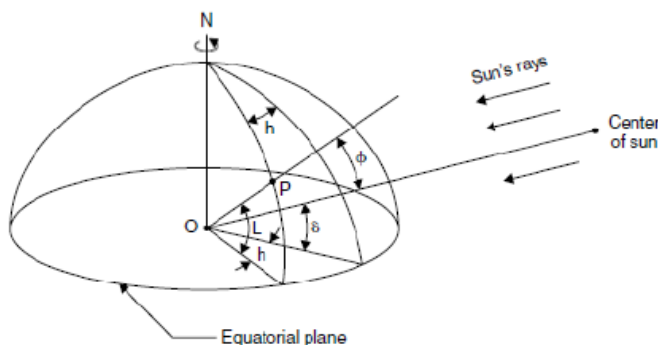


Figura 40: Definición de ángulos solares

Cualquier lugar de la superficie de la Tierra puede definirse con la intersección del ángulo de latitud y el de longitud (L).

- **Ángulo de altitud solar α** , definido como el ángulo entre el rayo central del Sol y un plano horizontal que contiene el observador. Puede medirse a partir del ángulo de latitud, el ángulo horario y la declinación del Sol.

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\phi)] \quad (6.7)$$

- **Ángulo cenital solar θ_z** , es un ángulo alternativo al ángulo de altitud solar para definir la altura del Sol. Es el ángulo complementario al ángulo de altitud solar α .

$$\theta_z = 90 - \alpha \quad (6.8)$$

- **Ángulo de azimut solar A** , es el segundo ángulo necesario para definir la posición del Sol respecto al sistema de coordenadas observador-Sol. Es el ángulo, medido en sentido horario en el plano horizontal, es el formado por el eje de coordenadas que apunta en dirección norte y la proyección de los rayos centrales del Sol en el plano horizontal.

$$A'' = \cos^{-1} \left[\frac{\sin(\delta) \cos(\phi) - \cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\phi)}{\cos(\alpha)} \right] \quad (6.9)$$

donde

$$\begin{cases} A = 360 - A'' & \text{si } \omega > 0 \\ A = A'' & \text{si } \omega \leq 0 \end{cases}$$

Una vez calculados todos los ángulos, se puede calcular el vector S , que marcará la posición del Sol con respecto a nuestros ejes de coordenadas. En nuestros ejes, el origen será la torre, el eje x marcará la dirección este-oeste, el eje y marcará la dirección norte-sur, y el z marcará la dirección perpendicular al suelo.

$$\vec{s} = s_e \vec{i} + s_n \vec{j} + s_z \vec{k} \quad (6.10)$$



donde

$$\begin{aligned}s_e &= \cos(\alpha) \sin(A) \\ s_n &= \cos(\alpha) \cos(A) \\ s_z &= \sin(\alpha)\end{aligned}$$

Eficiencia y número de heliostatos

La potencia calorífica necesaria para la central se puede calcular a partir de la potencia eléctrica y a los rendimientos.

$$\dot{Q}_i = \frac{W_e}{\eta_{\text{ciclo}} \eta_{\text{almacenamiento térmico}} \eta_{\text{receptor}} \eta_{\text{pérdidas radiación}} \eta_{\text{pico}}} \quad (6.11)$$

Las eficiencias sirven para tener en cuenta las pérdidas que se ocasionan [14]. Estas pérdidas se representan en la figura 41.

- **Pérdidas en la captación**, que se engloban en dos grupos, las pérdidas geométricas y las pérdidas por reflectividad.
 - Pérdidas geométricas, debidas a las dimensiones y posiciones relativas de los elementos que integran el campo solar y de la posición del Sol.
 - ✓ *Pérdidas originadas por la reducción del área proyectada visible para el Sol*, causadas por la inclinación del eje óptico del heliostato con respecto a la trayectoria de los rayos solares. Estas pérdidas se cuantifican con el **factor coseno**.

$$\vartheta = 0.5 \cos^{-1}(\vec{s} \cdot \vec{t}) \quad (6.12)$$

donde \vec{t} es el vector que define la posición relativa del heliostato con respecto al receptor

$$\vec{t} = \frac{[(x_0 - x_h), (y_0 - y_h), (z_0 - z_h)]}{\sqrt{(x_0 - x_h)^2 + (y_0 - y_h)^2 + (z_0 - z_h)^2}}$$

$$factor\ coseno = \cos(\vartheta) \quad (6.13)$$

- ✓ *Pérdidas por sombras y bloqueos*, que cuantifican las sombras producidas por unos heliostatos sobre otros o por la torre sobre los heliostatos y la fracción de radiación que no alcanza el receptor al ser interceptada por los heliostatos vecinos. Se cuantifican con el **rendimiento de sombras y bloqueos**, η_{sb} .
- Pérdidas por reflectividad, que cuantifica la cantidad de radiación solar absorbida por la superficie reflexiva del heliostato. Esta radiación puede aumentar a medida que se ensucia el espejo. Llamaremos a este rendimiento **reflectancia** η_r .
- **Pérdidas en la transmisión a través de la atmósfera**, ya que la radiación sufre una atenuación en su camino al receptor debido a partículas que hay en la atmosfera, y se cuantifica con la **atenuación atmosférica** η_{at} , que puede estimarse como [91]

$$\eta_{at} = 0.99321 - 0.0001176S + 1.97 \cdot 10^{-8}S^2 \quad (6.14)$$

donde S es la distancia entre el heliostato y el receptor

- **Pérdidas en la captación de la radiación solar concentrada por el receptor**, que cuantifica la radiación reflejada que no alcanza la superficie del receptor. Estas pérdidas se miden con **el factor de desbordamiento o spillage** η_{sp} . Se estima como: [92]

$$\eta_{sp} = \frac{pH\left(\frac{d_r}{2\sqrt{2}\sigma_r}, -a_r, a_r\right) \cdot pH\left(\frac{h_r}{2\sqrt{2}\sigma_r}, -a_r, a_r\right)}{a_r^2} \quad (6.15)$$

$$pH(\xi_r, -a_r, a_r) = \frac{1}{2} \{ (\xi_r + a_r) \operatorname{erf}(\xi_r + a_r) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-(\xi_r + a_r)^2} - (\xi_r - a_r) \operatorname{erf}(\xi_r - a_r) - \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-(\xi_r - a_r)^2} \} + \text{constante}$$

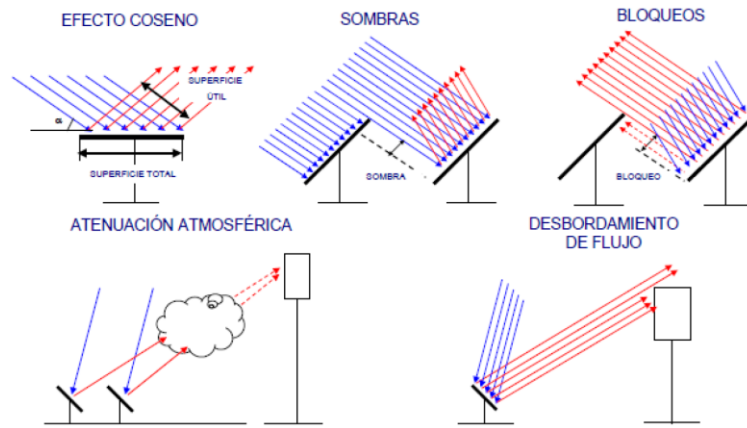


Figura 41: Tipos de pérdidas de un heliostato [14]

Para calcular las pérdidas de radiación debemos calcular el calor por radiación emitido por los tubos del receptor. El circuito equivalente del receptor se encuentra en la figura 42.

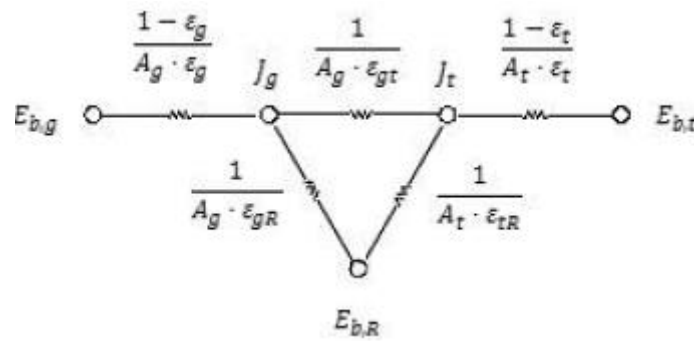


Figura 42: Circuito equivalente del receptor [14]

El calor de radiación se obtiene de la ecuación:

$$\dot{Q}_{rad} = \frac{\sigma(T_t^4 - T_g^4)}{\frac{1}{A_{total}\epsilon_{eff}} + \frac{1}{A_{total}}\left(\frac{1}{\epsilon_g} - 1\right)} \quad (6.16)$$



donde

$$\begin{aligned}\sigma &\equiv \text{constante de Stefan - Boltzmann} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \\ T_t &\equiv \text{Temperatura de los tubos} \\ T_g &\equiv \text{Temperatura ambiente} \\ \varepsilon_g &\equiv \text{Emisividad del aire}\end{aligned}$$

Además

$$A_{total} = \pi d_r h_r \quad (6.17)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{F_{gt}(2 - F_{gt})} + \frac{p + d_e}{\pi d_e} \left(\frac{1}{\varepsilon_t} - 1 \right)} \quad (6.18)$$

donde

$$F_{gt} = 1 - \frac{d_e}{p + d_e} \left[\sqrt{\left(\frac{p + d_e}{d_e} \right)^2 - 1} - \cos^{-1} \left(\frac{d_e}{p + d_e} \right) \right] \quad (6.19)$$

Para el cálculo de la temperatura de los tubos se tomarán las propiedades de la sal a partir de la ecuación:

$$T_{propiedades} = \frac{T + T_t}{2} \quad (6.20)$$

dándose un valor inicial para la primera iteración.

El coeficiente global de transferencia de calor puede calcularse como se ha explicado en el capítulo V.

$$T_t = \frac{T_s e^{\frac{UA}{\dot{m}_s c_{p,s}}} - T_e}{e^{\frac{UA}{\dot{m}_s c_{p,s}}} - 1} \quad (6.21)$$

$$\dot{m}_s = \left(\dot{Q}_i - \frac{A_{total}}{\frac{1}{\varepsilon_{eff}} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1} \cdot \sigma (T_t^4 - T_g^4) \right) \cdot \frac{1}{C_{p,s}(T_s - T_e)} \quad (6.22)$$

Una vez calculado el calor perdido por radiación:

$$\eta_{pérdidas radiación} = \frac{\dot{Q}_i - \dot{Q}_{rad}}{\dot{Q}_i} \quad (6.23)$$

El número de heliostatos necesarios puede obtenerse despejando

$$\dot{Q}_i = I_o n_h A_h \frac{\sum_{n=1}^n \eta_h(n)}{n_h} \quad (6.24)$$

donde

$$\eta_h = \rho \eta_{sp} \eta_r \eta_{at} \eta_{sb} \cos(\vartheta) \quad (6.25)$$

Los heliostatos se ubicarán en coordenadas polares (figura 36), donde la coordenada r se obtendrá con el radio del anillo en el que se encuentra el heliostato, y la coordenada θ puede hallarse como

$$\theta(n) = 90^\circ - (n - 1) \frac{\Delta L(i)}{R(i)} \quad (6.26)$$

Para ubicar los heliostatos pasamos a cartesianas:

$$x = R \cos(\theta) \quad (6.27)$$

$$y = R \sin(\theta) \quad (6.28)$$



6.2. Procedimiento de cálculo

En primer lugar para llevar a cabo el cálculo iterativo han de fijarse distintos parámetros, como la altura de la torre, la potencia de la central a diseñar, las dimensiones de los heliostatos que conformarán el campo y las del receptor. También ha de escogerse el punto de diseño, que determinará los ángulos de posición solar y la radiación directa incidente sobre los heliostatos.

Para calcular el número de heliostatos, ha de darse un valor para todos los rendimientos de los que se ha hablado anteriormente. Para algunos de estos rendimientos se tomará el valor de otras publicaciones. Los rendimientos de atenuación atmosférica, pérdidas por radiación, desbordamiento y el factor coseno se calcularán posteriormente con las ecuaciones 6.12, 6.13, 6.14, 6.15 y 6.23. Tomarán como valor de la primera iteración la unidad. Una vez estimado el número de heliostatos necesarios para nuestra planta (ec 6.24) y ubicados (ec 6.1, 6.26, 6.27 y 6.28) pueden calcularse los valores de los rendimientos. El proceso iterativo acaba cuando el número de heliostatos es el mismo en dos iteraciones consecutivas.

A continuación, debe iterarse con las ecuaciones 6.20, 6.21 y 6.22 hasta obtener un valor de la temperatura de los tubos y del gasto másico de sal que circula por ellos.

En la figura 43 se muestra el procedimiento de cálculo en un diagrama de flujo.

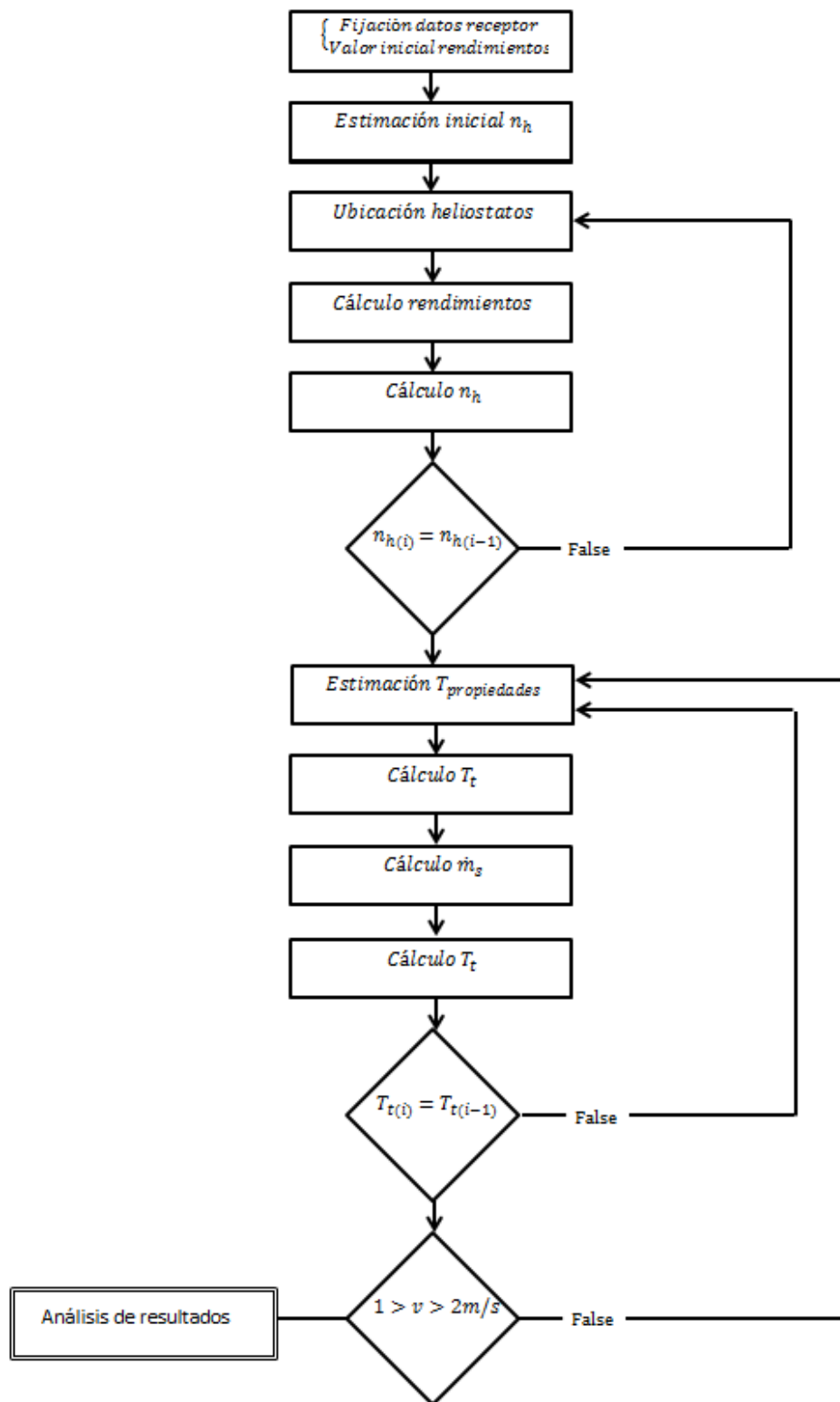


Figura 43: Diagrama de flujo del subsistema receptor



NOMENCLATURA

α	Ángulo de altitud solar [°]
δ	Ángulo de declinación [°]
ΔL	Distancia longitudinal entre heliostatos [m]
ΔR	Distancia radial entre anillos [m]
ε_{eff}	Emisividad efectiva de los tubos
ε_g	Emisividad del aire
ε_t	Emisividad de los tubos
$\eta_{almacenamiento\ térmico}$	Rendimiento de almacenamiento térmico
η_{ciclo}	Rendimiento del ciclo Rankine
η_{at}	Rendimiento de atenuación atmosférica
η_h	Rendimiento del heliostato
$\eta_{pérdidas\ radiación}$	Rendimiento de las pérdidas por radiación
η_{pico}	Rendimiento de pico
η_r	Rendimiento de reflectancia
$\eta_{receptor}$	Rendimiento del receptor
η_{sb}	Rendimiento de sombras y bloqueos
η_{sp}	Rendimiento de desbordamiento
θ	Coordenada polar
θ_z	Ángulo cenital solar [°]
ρ	Reflectividad espejo
σ	Constante de Stefan – Boltzmann [W/m^2K^4]
σ_r	Desviación estandar receptor
ϕ	Ángulo latitud [°]
ω	Ángulo horario [°]
A''	Ángulo auxiliar [°]
A	Ángulo de azimut solar [°]
A_h	Área del heliostato [m^2]
AST	Hora del día
A_{total}	Área de intercambio del receptor [m^2]
a_r	Parámetro cálculo
$\cos(\vartheta)$	Factor coseno
$C_{p,s}$	Calor específico de la sal [W/m^2K]
d_e	Diámetro exterior de los tubos [m]
d_r	Diámetro del receptor [m]
F_{gt}	Parámetro de cálculo de radiación [m^2]
h_r	Áltura del receptor [m]
i	Número de anillo
I_0	Radiación directa [W/m^2]
\dot{m}_s	Caudal másico de sal [kg/s]



N	<i>Número de día</i>
NH	<i>Número de heliostatos por fila</i>
n_h	<i>Número de heliostatos</i>
\dot{Q}_i	<i>Potencia calorífica recibida [W]</i>
\dot{Q}_{rad}	<i>Potencia calorífica perdida por radiación [W]</i>
R	<i>Radio del anillo [m]</i>
S	<i>Distancia del heliostato al receptor [m]</i>
\vec{s}	<i>Vector posición sol</i>
\vec{t}	<i>Vector posición heliostato</i>
T	<i>Temperatura propiedades iteración anterior [°C]</i>
T_e	<i>Temperatura entrada de la sal [°C]</i>
T_g	<i>Temperatura aire exterior [°C]</i>
$T_{propiedades}$	<i>Temperatura propiedades de la sal [°C]</i>
T_s	<i>Temperatura salida de la sal [°C]</i>
T_t	<i>Temperatura de los tubos [°C]</i>
UA	<i>Coeficiente transferencia calor por unidad de área [W/K]</i>
W_e	<i>Potencia eléctrica de la central [MW]</i>
w_r	<i>Relación altura – anchura del heliostato</i>
x	<i>Coordena cartesiana</i>
x_0	<i>Posición del eje x del receptor</i>
x_h	<i>Posición del eje x del heliostato</i>
y	<i>Coordena cartesiana</i>
y_0	<i>Posición del eje y del receptor</i>
y_h	<i>Posición del eje y del heliostato</i>
z_0	<i>Posición del eje z del receptor</i>
z_h	<i>Posición del eje z del heliostato</i>



DISEÑO Y ANÁLISIS TÉRMICO DE UNA PLANTA DESALINIZADORA SOLAR DE TORRE DE
CONCENTRACIÓN



7. Análisis de resultados



7.1. Ciclo de desalinización

En la propia PSA existe una unidad piloto de desalinización por MED. En primer lugar, compararemos los resultados publicados con los obtenidos con el código generado en Matlab. [62][93]

Tabla 3

Comparación de resultados PSA

Parámetros	PSA	Matlab	Error [[%]]
<i>Número de efectos n</i>	14	14	-
<i>Caudal másico alimentación \dot{m}_a, [kg/h]</i>	8000	8000	-
<i>Caudal másico de vapor en el primer efecto \dot{m}_s [kg/h]</i>	295.92	295.92	-
<i>Máxima temperatura de la salmuera T_1 [°C]</i>	68	67.97	0.04
<i>Temperatura del condensador T_n [°C]</i>	32.3	33.3	3.1
<i>Temperatura de vapor T_s [°C]</i>	70.8	71.93	1.6
<i>Caudal másico destilado \dot{m}_d [kg/h]</i>	3003	2712	9.7
<i>GOR [-]</i>	10.2	10.63	4.22
<i>Área de los efectos A_e [m²]</i>	26.13	19.43	25.6
<i>Área del condensador A_c [m²]</i>	18.3	20.42	11.6

Se puede observar que los resultados obtenidos son parecidos a los que se han experimentado en la PSA. Sin embargo, se trata de una unidad de experimentación, y el agua obtenida es insuficiente para abastecer a una población.

La idea de este proyecto es diseñar una central con mayor capacidad de destilación, de formas que tomaremos algunos valores de otras centrales operativas y optimizaremos el proceso.

El número de efectos de una planta puede variar entre 4 y 16. Como se ve en el gráfico 13, el GOR aumenta de manera lineal con el número de efectos, del mismo modo que el área específica (área de los efectos por la cantidad de agua potable obtenida) disminuye, como se ve en el gráfico 14. En el diseño de la planta, se priorizará este parámetro, por lo que se utilizará el número máximo de efectos posible. Fijaremos este número máximo como 16 efectos. [94] Un número mayor de efectos supondría un área demasiado grande, y la planta estaría sobredimensionada.

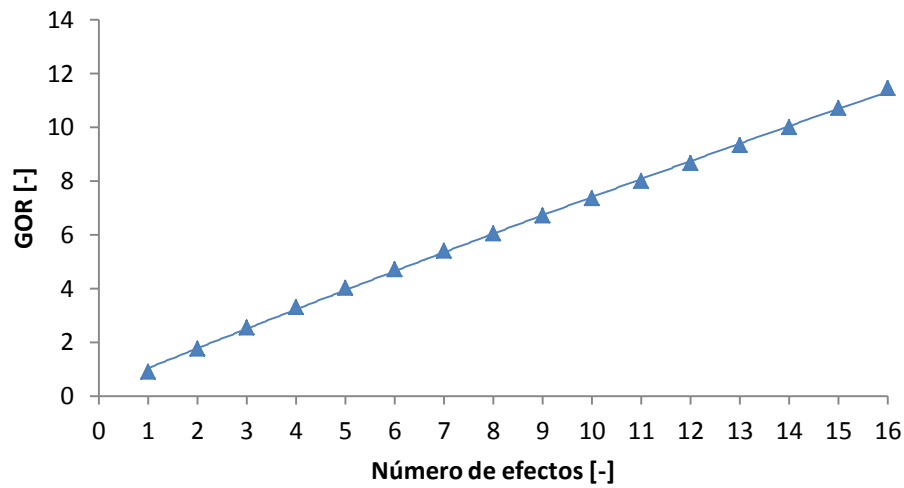


Gráfico 13: GOR vs número de efectos

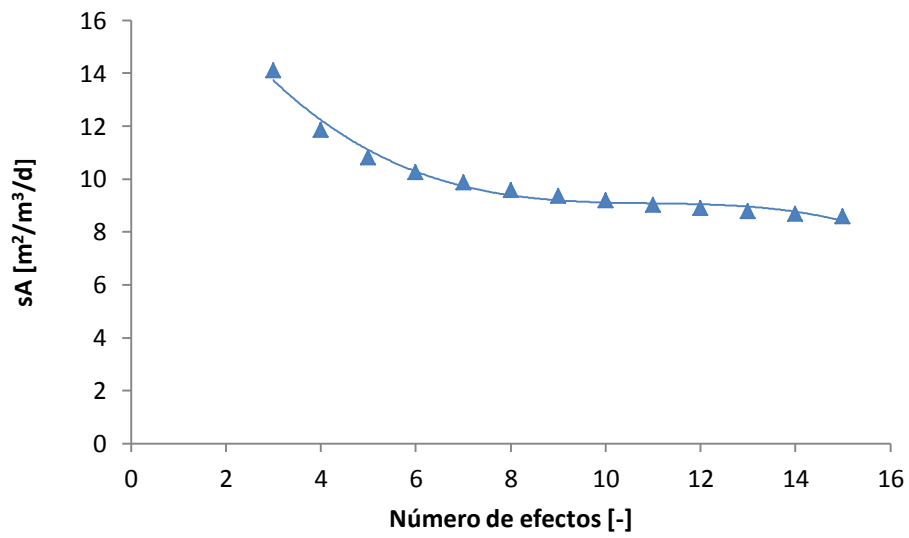


Gráfico 14: Área específica vs número de efectos



Ahora, al fijar los parámetros de temperatura, puede obtenerse la temperatura en los efectos.

Tabla 4
Temperaturas en los efectos

Efecto	Temperatura [°C]		BPE [°C]
	Salmuera, T_i	Vapor, T_{vi}	
1	71.35	70.52	0.83
2	69.1	68.34	0.76
3	66.85	66.14	0.71
4	64.6	63.94	0.66
5	62.35	61.72	0.63
6	60.1	59.5	0.6
7	57.85	57.27	0.58
8	55.6	55.04	0.56
9	53.35	52.8	0.55
10	51.1	50.56	0.54
11	48.85	48.32	0.53
12	46.6	46.07	0.53
13	44.35	43.82	0.53
14	42.1	41.56	0.54
15	39.85	39.3	0.55
16	37.6	37.02	0.58

En la tabla 4 se observa como en los efectos la temperatura va disminuyendo. La diferencia de temperatura entre estos efectos se encuentra dentro del intervalo fijado en la restricción I. La temperatura de vapor es ligeramente inferior a la de la salmuera en cada efecto, como se ha explicado anteriormente, y vemos que esta diferencia es el BPE calculado.

En la tabla 5 se muestran los valores de los caudales másicos y de salmuera de cada uno de los efectos. Los valores del caudal de destilado van disminuyendo poco a poco debido a que la temperatura de los efectos es menor y se evapora menos agua, aunque a partir del efecto 8 este caudal aumenta notablemente. Esto se debe a que al mismo tiempo que disminuye la temperatura disminuye la presión en el efecto, lo que disminuye el punto de ebullición, y favorece la evaporación. Las simplificaciones tenidas en cuenta para la realización de los cálculos incrementan este fenómeno, y hace que el área de los efectos varíe significativamente.



Tabla 5

Caudales máxicos destilados y salmueras

Efecto	\dot{m}_{di} [kg/s]	\dot{m}_{si} [kg/s]	A_{ei} [m ²]
1	4.10	5.76	455
2	3.38	12.25	1320
3	2.80	19.30	1004.70
4	2.36	26.82	722.21
5	2.03	34.64	606.04
6	1.84	42.66	504.16
7	1.78	50.75	467.03
8	1.84	58.77	497.10
9	2.05	66.58	598.72
10	2.42	74.02	778.33
11	2.94	80.95	1044.70
12	3.64	87.17	1409.70
13	4.54	92.49	1889.20
14	5.67	96.68	2504.90
15	7.06	99.48	3287.10
16	8.75	100.59	4243.40

En la tabla 6 se muestran los principales resultados obtenidos. Tras realizar 9 iteraciones, se ha conseguido alcanzar una solución válida al sistema. La cantidad de agua destilada obtenida es mucho mayor que la calculada en la tabla 3, pero el área necesaria en cada efecto es mucho mayor, por lo que la instalación también será más cara. El GOR del sistema es aceptablemente alto, por lo que puede concluirse que la solución obtenida es válida para el prediseño.



Tabla 6
Resultados

iteraciones	9	-
Temperatura del mar, T_m [°C]	26.6	Dato de partida
Temperatura de alimentación, T_a [°C]	36.6	Fijado (III)
Caudal másico de alimentación, \dot{m}_a [kg/s]	157.8	Dato de partida
Caudal másico de vapor, \dot{m}_v [kg/s]	5	Dato de partida
Temperatura de vapor, T_s [°C]	81.73	Calculado (3.4)
Caudal másico destilado, \dot{m}_d	57.21	Calculado (3.7)-(3.9)
GOR	11.44	Calculado (3.24)
sA [m ² /m ³ /d]	9.22	Calculado (3.25)
Área media en los efectos, $A_{e,media}$ [m ²]	1335.1	Calculado (3.16)-(3.18)
Longitud de placa en los efectos, L_p [m]	1.822	Supuesto [67]
Anchura de placa en los efectos, w [m]	1.242	Supuesto [67]
Número de placas en los efectos, N_p	590	Calculado (3.20)
Área del condensador, A_c [m ²]	1434.2	Calculado (3.21)
Diámetro de los tubos, D_0 [m]	0.0254	Dato de partida
Número de pasos por tubo, N_{pt}	2	Dato de partida
Longitud de los tubos, L_T [m]	4.1	Supuesto [67]
Número de tubos, N_T	2192	Calculado (3.21)
Diámetro de la carcasa, D_s [m]	3.4	Calculado
Salinidad en el último efecto, X_n [ppm]	54905	Calculado (3.13)

La central genera unos 2.500.000 l/d, y teniendo en cuenta que una persona media consume aproximadamente 160 l/d [95], la central podría abastecer a una población de más de 15000 personas, por lo que podría abastecer a una población 4 veces superior a la de Tabernas [96].

7.2. Ciclo Rankine

Para los cálculos del ciclo Rankine debe definirse la presión de alta. Con ayuda del programa Cyclepad, esta presión se fijara en 100 bares. Una presión de alta mayor haría que la temperatura máxima del ciclo superara los 600°C, por lo que el intercambiador no funcionaría correctamente. Ahora ya se tienen todos los datos necesarios para la resolución de las ecuaciones del capítulo 5.

Tabla 7
Resultados ciclo.

Punto	1	2'	2	X	Y	3	4'	4
Estado	líquido saturado	líquido subenfriado	líquido subenfriado	Líquido saturado	vapor saturado	vapor sobrecalentado	mezcla bifásica	mezcla bifásica
T [°C]	81.73	82.27	83.14	356.8	356.8	535	81.73	81.73
s [kJ/kgK]	1.09	1.09	1.1	3.87	5.1	6.3497	6.35	6.94
h [kJ/kg]	342.17	358.24	362.26	1733.88	2503.57	3402.9	2206.4	2416.1
P [bar]	0.51	180	180	180	180	180	0.51	0.51
X [-]	0	-	-	0	1	-	0.809	0.9
w _B [kJ/kg]	20.09		q _{IC} [kJ/kg]	3040.64		w _T [kJ/kg]	986.8	
q _{MED} [kJ/kg]	2073.93		η _{CICLO} [-]	0.47		rw [-]	0.02	

El ciclo de vapor generado con Cyclepad se representa en la figura 43.

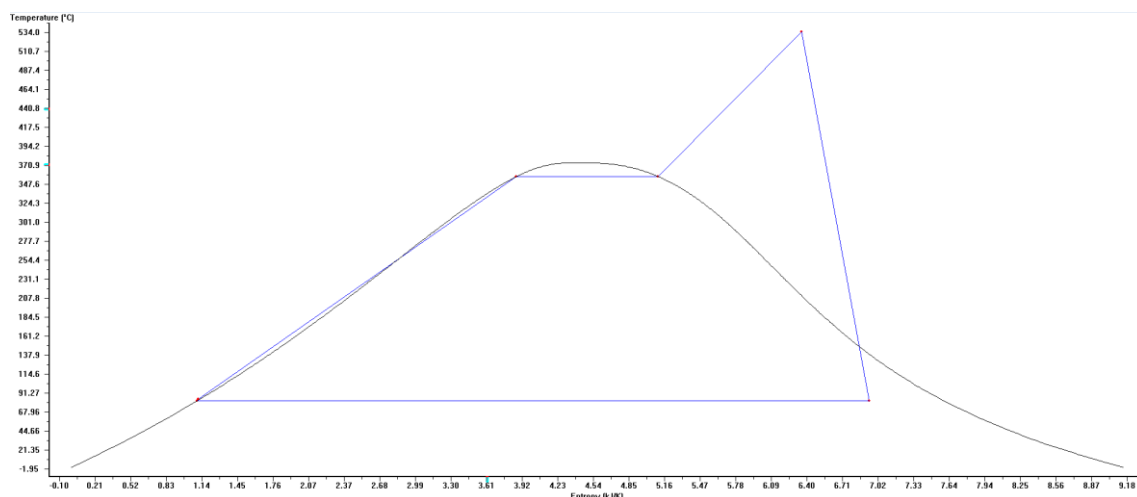


Figura 44: Diagrama T-s generado por el software Cyclepad



7.3. Intercambiador sal-vapor

Hay varios parámetros que fijar para poder resolver las ecuaciones del capítulo 6, que se recogen en la tabla 8.

Tabla 8

Datos del intercambiador de calor

D_o [m]	0.0254	Dato de partida
e [m]	0.0015	Dato de partida
D_i [m]	0.0224	Calculado
N_T	150	Dato de partida
N_p	2	Dato de partida
P_t [m]	0.0318	Calculado
D_s [m]	0.4388	Calculado (5.26)
L_b [m]	0.2	Dato de partida
D_e [m]	0.0251	Calculado (5.27)
S_s [m ²]	0.0176	Calculado (5.28)
k_T [W/mK]	21.4	[97]

La corrosión es el daño superficial que puede sufrir un material al estar expuesto a un entorno reactivo. Las sales y el vapor de agua son de los típicos causantes de este daño, que puede llegar a dañar el equipo [98].

La alta corrosión que puede provocar el vapor de agua a altas temperaturas y la sal fundida hacen indispensable el uso de acero inoxidable para la fabricación de los tubos. En estos aceros, el cromo es el principal elemento de aleación, aunque adiciones de níquel y molibdeno pueden aumentar la resistencia a la corrosión. [99] La conductividad del material elegido debe ser tan alta como sea posible, para aumentar el coeficiente global de transferencia de calor, y así disponer de un intercambiador de menor tamaño. Tomaremos el acero inoxidable AISI 316L [97].

Con las temperaturas de entrada y salida de agua al intercambiador, calculadas con las ecuaciones (5.11) y (5.15), se calcula la diferencia media logarítmica de



temperatura. También se puede calcular la eficiencia del intercambiador con la ecuación (6.1). Estos datos se recogen en la tabla 9.

Tabla 9

Temperaturas de los flujos y diferencia media logarítmica de temperatura

T_e [°C]	560
T_s [°C]	290
t_e [°C]	101.13
t_s [°C]	548.26
ΔT_{ml} [K]	61.6
ε [—]	0.6

El valor de la eficiencia del intercambiador es algo bajo. Este valor se tomará como válido porque el intercambiador no es el principal objeto de estudio en este trabajo, y se fijará la eficiencia de los efectos con el mismo valor. El comportamiento de los fluidos dentro del intercambiador se representa en el gráfico 15. En rojo se representa el comportamiento que tiene la sal dentro del intercambiador, donde desde su entrada por el punto 3 disminuye su temperatura al ceder calor al flujo frío. El agua eleva su temperatura hasta llegar a la temperatura de saturación, donde se transforma en vapor. En la gráfica se muestra claramente la transformación, ya que no se eleva la temperatura del fluido, dado que toda la energía se invierte en la transformación. A continuación, el vapor eleva su temperatura hasta la salida del intercambiador.

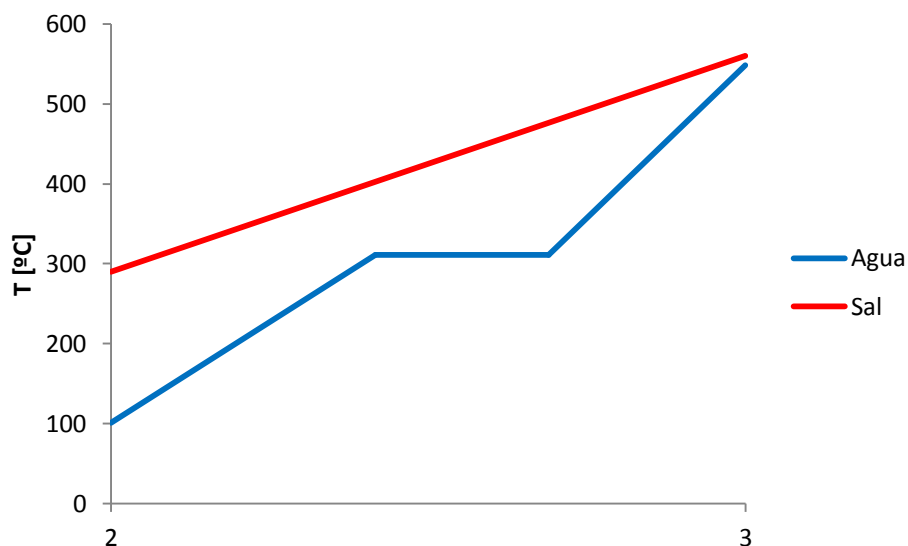


Gráfico 15: Perfiles de temperaturas en el intercambiador

Una vez conocidas todas las temperaturas de entrada y salida de los flujos del intercambiador, puede determinarse el factor de corrección a partir de las ecuaciones que van desde la (6.6) hasta la (6.12), iterando hasta alcanzar el valor de F necesario.

Tabla 10

Propiedades de los flujos

	Interno	Externo
\dot{m} [kg/s]	0.717/tubo	8.07
T_{prop} [°C]	425	325
C_p [J/kgK]	1516.1	7723.8
μ [Pa·s]	0.0016	$8.1 \cdot 10^{-5}$
k [W/mK]	0.5238	0.497
ρ [kg/m ³]	1819.7	648.9
Re [-]	25487	140770
Pr [-]	4.6295	1.2588
Nu [-]	154.81	263.82
h [kW/m ² K]	3.62	5.16
\dot{Q} [MW]	22.02	

En la tabla 10 se presentan las principales características de los dos flujos del intercambiador. El flujo interno está mucho más dominado por la viscosidad, como



se observa comparando ambos números de Reynolds. El calor intercambiado entre los fluidos es de unos 22 MW.

Por último calculamos la geometría del precalentador, evaporador y sobrecalentador. En las tablas 11, 12 y 13 se recogen los principales datos sobre la geometría de las distintas partes del intercambiador de calor, así como las propiedades de los fluidos que lo atraviesan.

Tabla 11
Resultados precalentador

PRECALENTADOR			
T_e [°C]	405.3	\dot{Q} [MW]	9.4
T_s [°C]	290	A [m ²]	59.12
t_e [°C]	83.14	L_T [m]	2.47
t_s [°C]	311.1	L_s [m]	1.23
$C_{p,agua}$ [J/kgK]	4611.8	$N_{baffles}$	7
U [kW/m ² K]	1.667	F	0.8738
N	2		

Tabla 12
Resultados evaporador

EVAPORADOR			
T_e [°C]	525.84	\dot{Q} [MW]	9.83
T_s [°C]	405.3	A [m ²]	39.49
t_e [°C]	311.1	L_T [m]	1.65
t_s [°C]	311.1	L_s [m]	1.65
Δh_v [MJ/kg]	1.32	$N_{baffles}$	9
U [kW/m ² K]	2.58	F	1
N	1		



Tabla 13
Resultados sobrecalentador

SOBRECALENTADOR			
T_e [°C]	560	\dot{Q} [MW]	2.78
T_s [°C]	525.84	A [m ²]	23.3
t_e [°C]	311.1	L_T [m]	1
t_s [°C]	535	L_s [m]	0.5
$C_{p,vapor}$ [J/kgK]	2098	$N_{baffles}$	3
U [kW/m ² K]	1.667	F	0.9513
N	2		

La mayor parte de la energía calorífica se emplean en elevar la temperatura del líquido y en evaporar la masa de agua, por lo que el sobrecalentador tiene un tamaño mucho menor que las otras dos partes.

7.4. Subsistema receptor

Se utilizará la altura de la torre de la PSA, ya que nuestra central se ubicará allí (80 metros). La planta tendrá una potencia de 17 MWe.

Se tomaran los datos del receptor de la central Gemasolar [14], recogidos en la tabla 14.

Tabla 14
Datos del receptor

Diámetro del receptor, d_r [m]	8.1
Altura del receptor, h_r [m]	10.6
Diámetro de los tubos, d_e [mm]	35
Espesor de los tubos, e [mm]	1.5
Separación entre los tubos, p [mm]	5

Por simplicidad, se utilizarán heliostatos cuadrados, de 120 m².

Para elegir el punto de diseño estudiaremos la variación de la radiación solar del día 15 de cada mes en el gráfico 16.

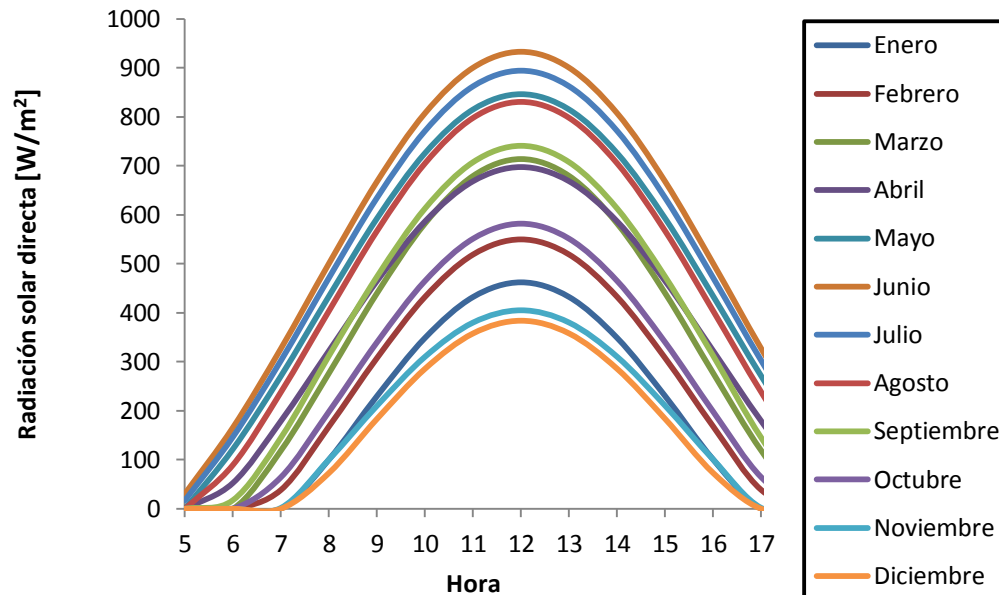


Gráfico 16: Variación horaria de la radiación solar en el día 15 de cada mes. Basado en [100].

Tomaremos un mes que tenga un valor intermedio. Por lo tanto fijaremos como punto de diseño el **15 de marzo a las 12 del mediodía**. En la tabla 15 se muestran los resultados obtenidos sobre los ángulos solares, necesarios para los cálculos de la eficiencia del sistema.

Tabla 15

Punto de diseño de la central

Radiación solar directa, DNI [W/m^2]	713.83	Supuesto [100]
Número de día, N	74	Dato de partida
Ángulo horario, ω [$^\circ$]	0	Calculado (6.5)
Ángulo de declinación, δ [$^\circ$]	-3	Calculado (6.6)
Ángulo de latitud, ϕ [$^\circ$]	37.0957	Supuesto [54]
Ángulo de altitud solar, α [$^\circ$]	49.8963	Calculado (6.7)
Ángulo cenital solar, θ_z [$^\circ$]	40.1037	Calculado (6.8)
Ángulo azimut solar, A [$^\circ$]	180	Calculado (6.9)

El código de Matlab realizar iteraciones calculando el número de heliostatos y su eficiencia hasta que la solución converge como se ve en el gráfico 17. El número de heliostatos inicial es bastante bajo, ya que hemos tomado varios rendimientos como la unidad, y al calcular los distintos rendimientos su número va aumentando.

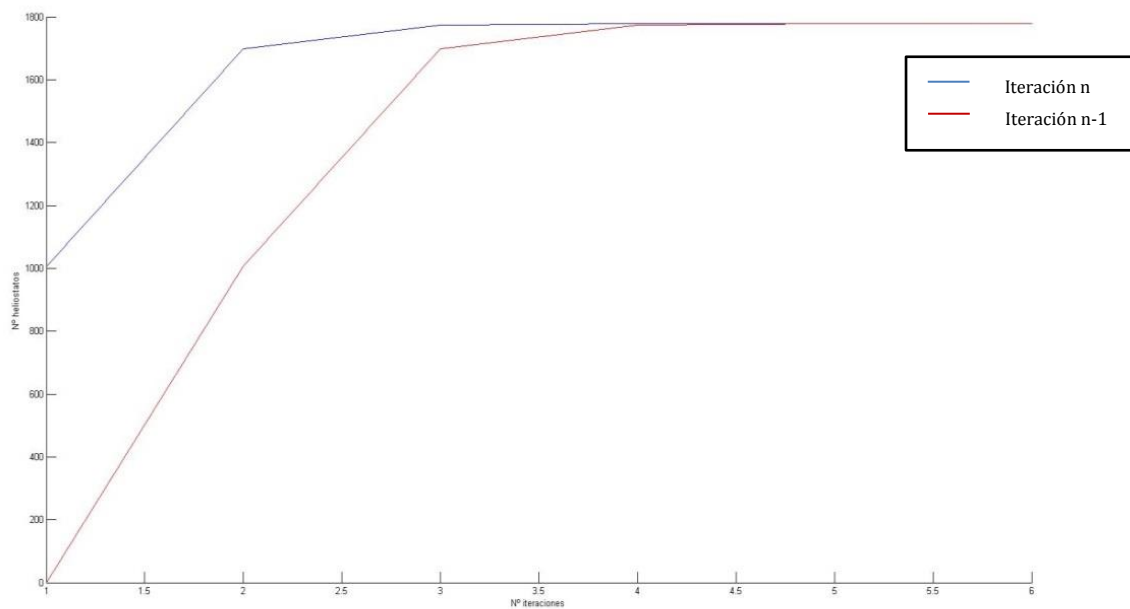


Gráfico 17: Cálculo iterativo del número de heliostatos

Los resultados se muestran en la tabla 16. Los heliostatos quedan ubicados como se muestra en la figura 44 y 45.



Tabla 16

Numero de heliostatos y eficiencia de estos

Número de heliostatos	1780	Calculado (6.24)
Rendimiento de almacenamiento térmico, $\eta_{\text{almacenamiento térmico}}$	0.99	[101]
Rendimiento de atenuación atmosférica, η_{at}	0.9379	Calculado (6.14)
Rendimiento de pérdidas por radiación, $\eta_{\text{pérdidas radiación}}$	0.893	Calculado (6.23)
Rendimiento de pico, η_{pico}	0.74	[101]
Rendimiento de reflectancia, η_r	0.9	[14]
Rendimiento del receptor, η_{receptor}	0.88	[101]
Rendimiento de sombras y bloqueos, η_{sb}	0.95	[101]
Rendimiento de desbordamiento, η_{sp}	0.7155	Calculado (6.15)
Rendimiento medio del heliostato, η_h	0.4358	Calculado (6.25)

El número de heliostatos es de 1780, que es un número bastante aceptable para este tipo de centrales. Todos los rendimientos calculados rondan el 90%, que es un valor bastante elevado de eficiencia. El rendimiento de desbordamiento baja hasta el 70%, debido a que al haber un gran número de heliostatos los más alejados al receptor bajan mucho el rendimiento medio. El valor del rendimiento medio del heliostato no llega al 45%, por lo que es algo bajo. Esto se debe a que para optimizar el campo de heliostatos habría que cambiar la ubicación de los heliostatos de menor eficiencia hacia el sur, aumentando la eficiencia media.

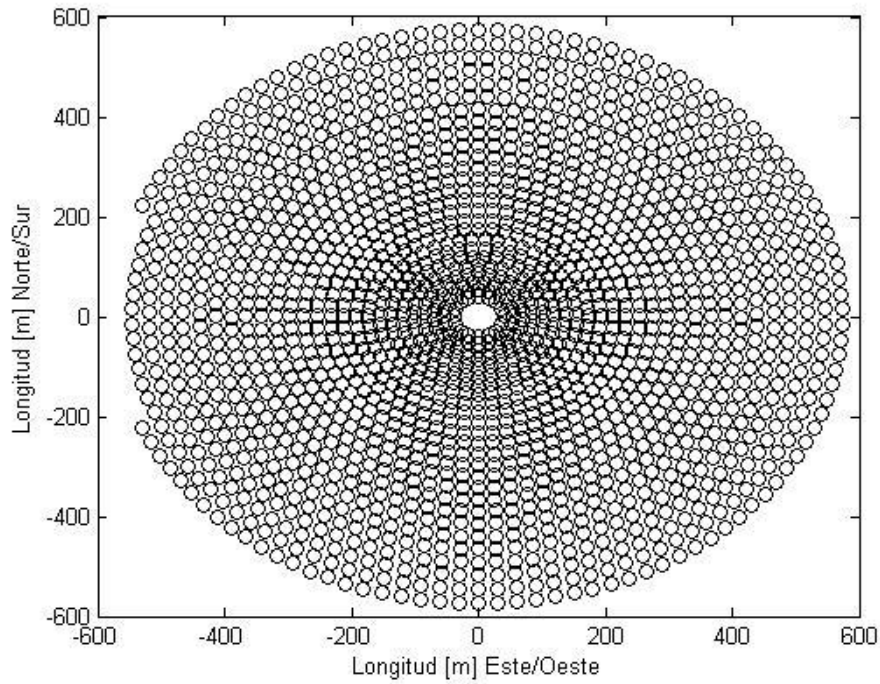


Figura 45: Campo de heliostatos generado por el software Matlab

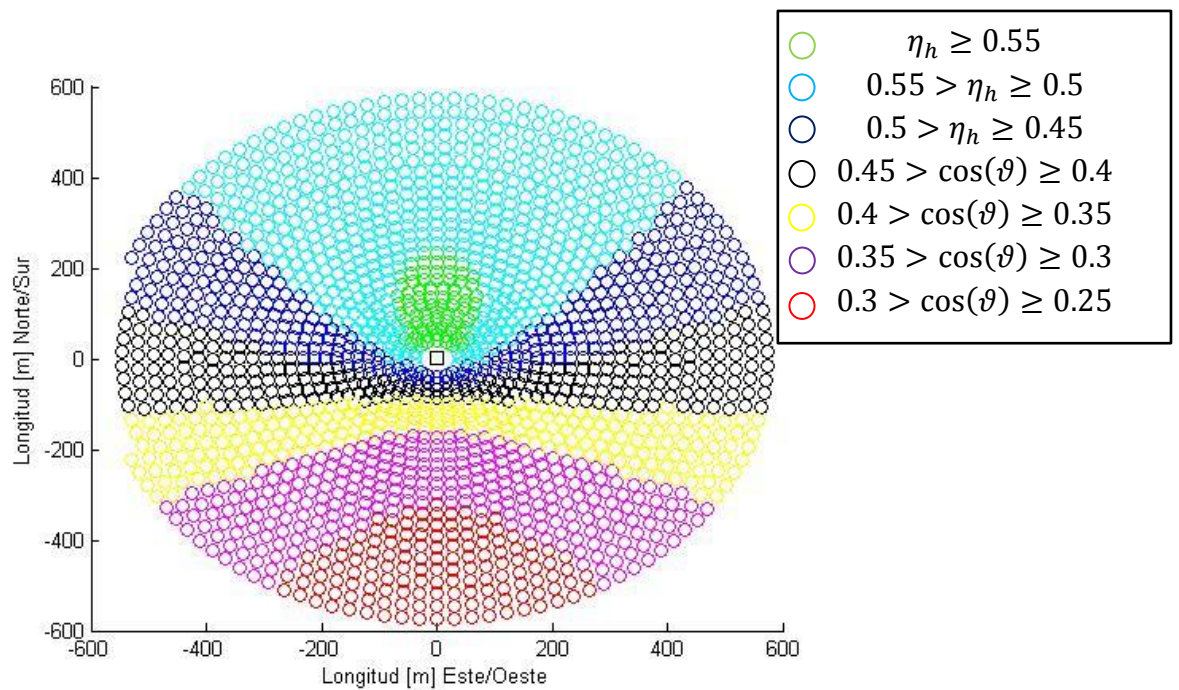


Figura 46: Campo de heliostatos coloreados según su eficiencia generado por Matlab

En la figura 45 se agrupan los heliostatos según su eficiencia total, η_h . Los heliostatos ubicados más al sur tienen una mayor eficiencia debido a su localización favorable. Además, a medida que los heliostatos se alejan del receptor su eficiencia disminuye.

A continuación se estudiará la influencia de la época del año en el efecto coseno de los heliostatos, que resulta de gran importancia a la hora de evaluar el rendimiento de los heliostatos. Se calculará el efecto coseno para el día 15 de cada mes del año, y se comprobará si es un parámetro importante en los cálculos del campo de heliostatos.

15 de enero

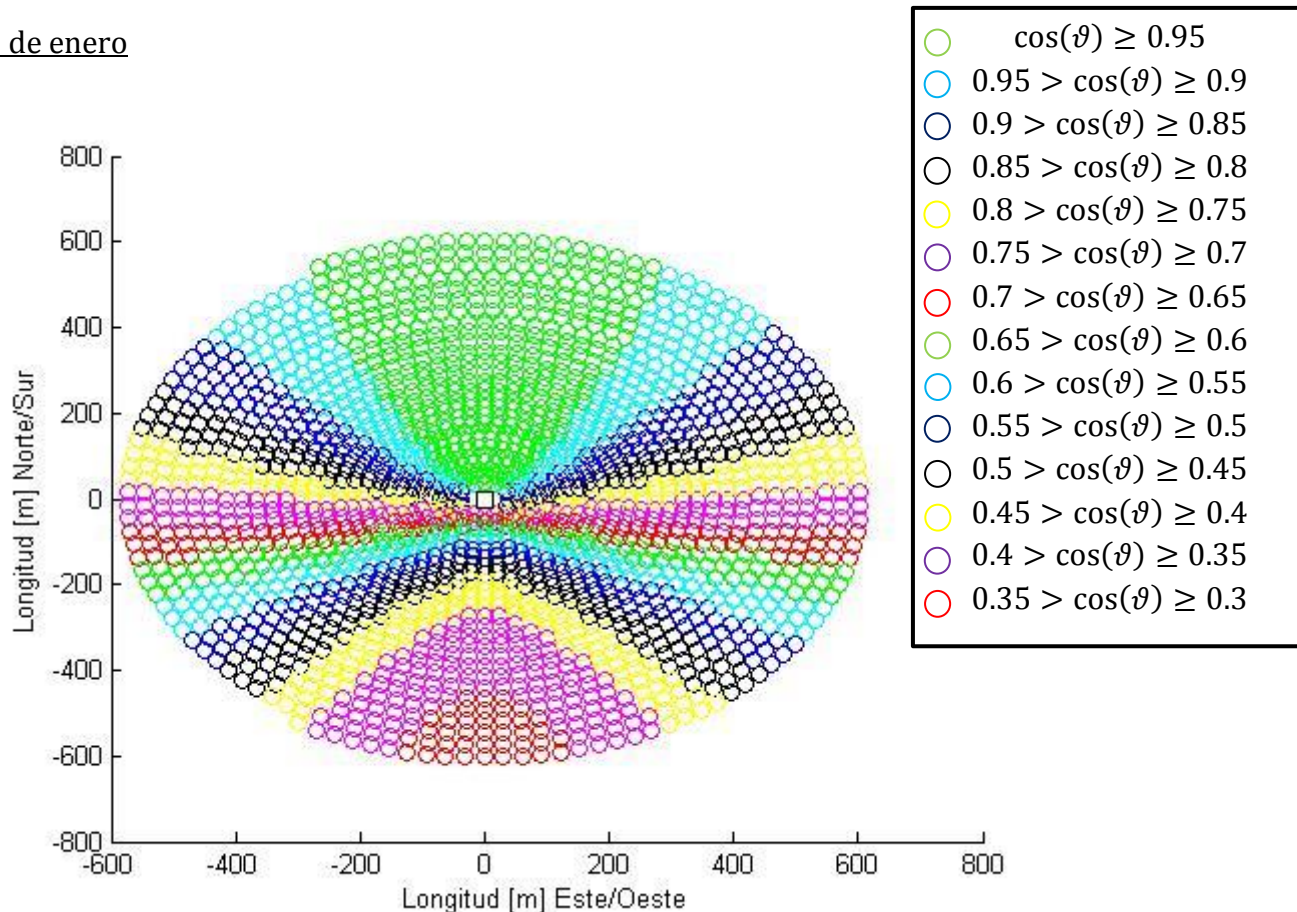


Figura 47: Campo de heliostatos coloreados según su factor coseno en enero generado por Matlab

Número de día	15
Factor coseno medio	0.7229

Tabla 17: Resultados del factor coseno en enero

15 de febrero

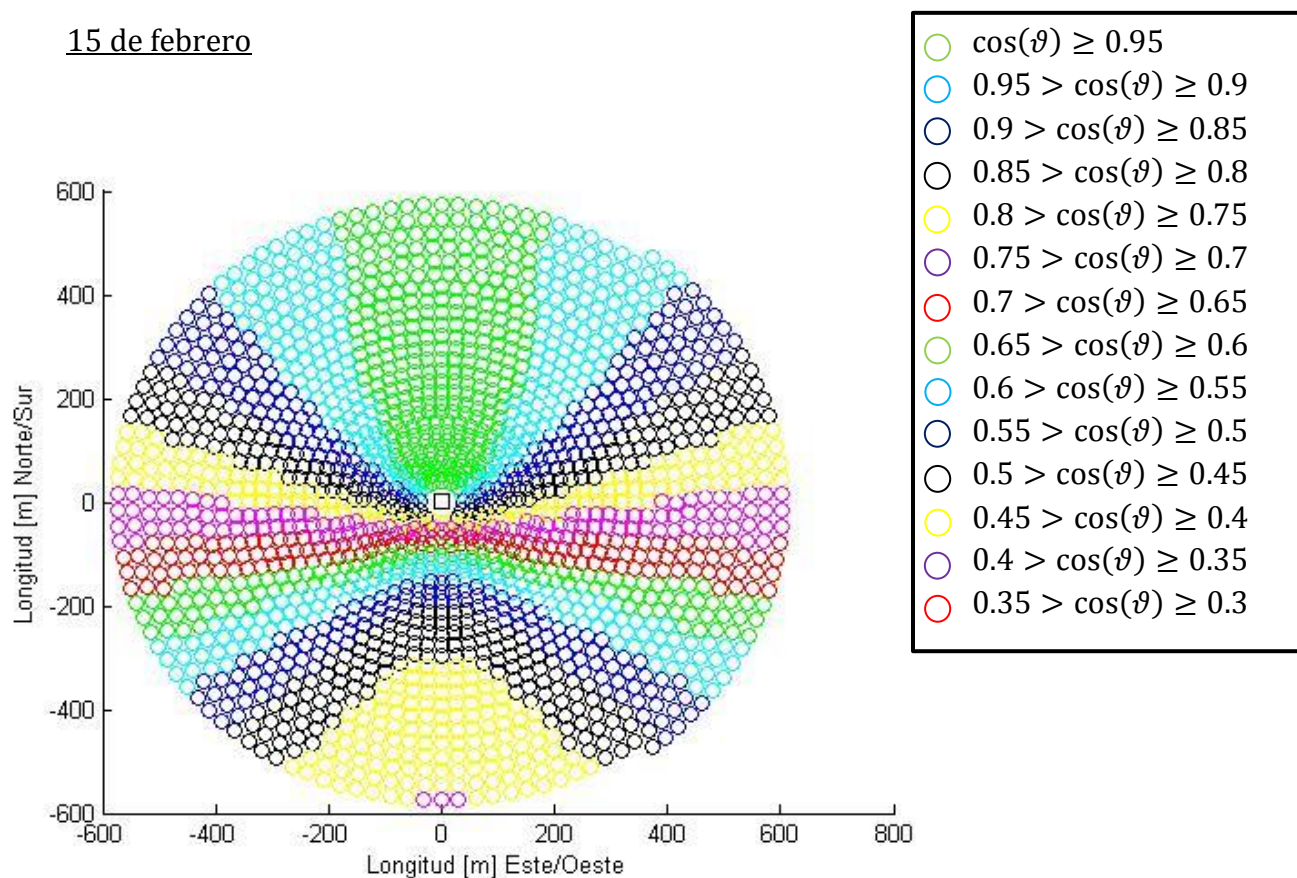


Figura 48: Campo de heliostatos coloreados según su factor coseno en febrero generado por Matlab

Número de día	46
Factor coseno medio	0.7409

Tabla 18: Resultados del factor coseno en febrero

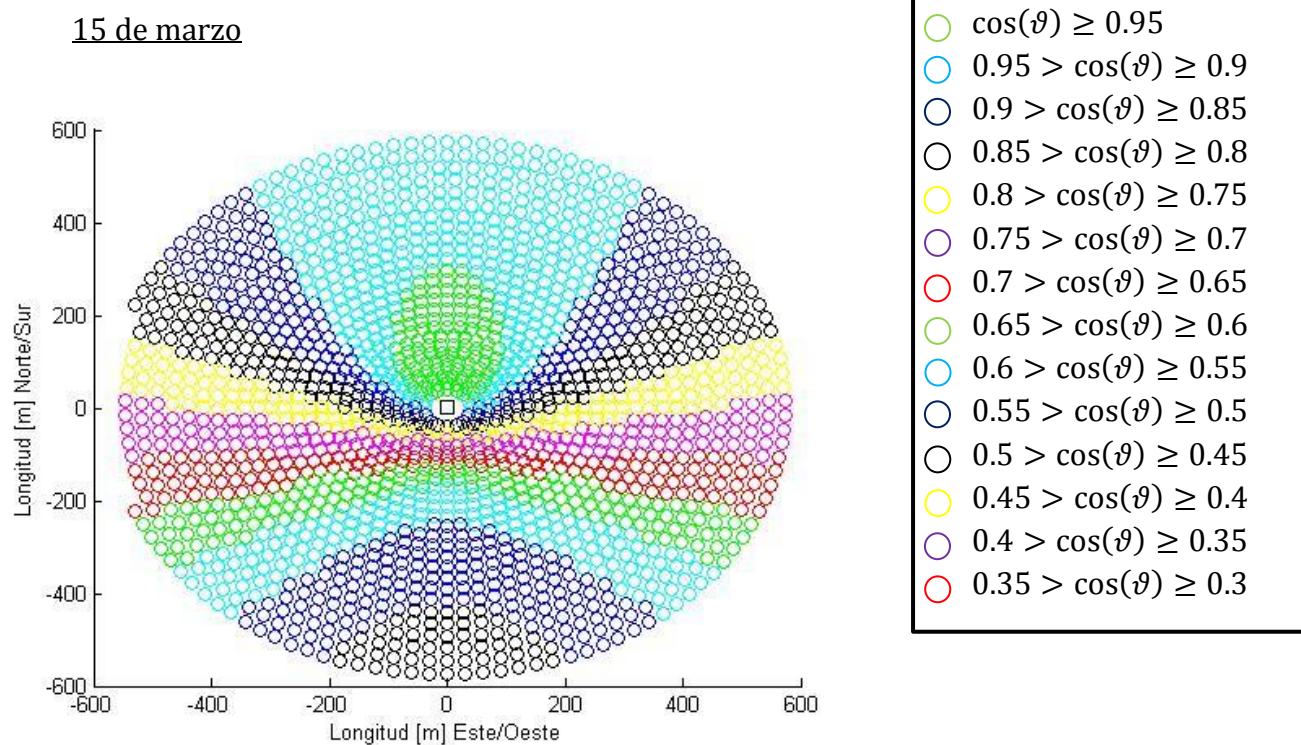


Figura 49: Campo de heliostatos coloreados según su factor coseno en marzo generado por Matlab

Número de día	74
Factor coseno medio	0.7596

Tabla 19: Resultados del factor coseno en marzo

14 de abril

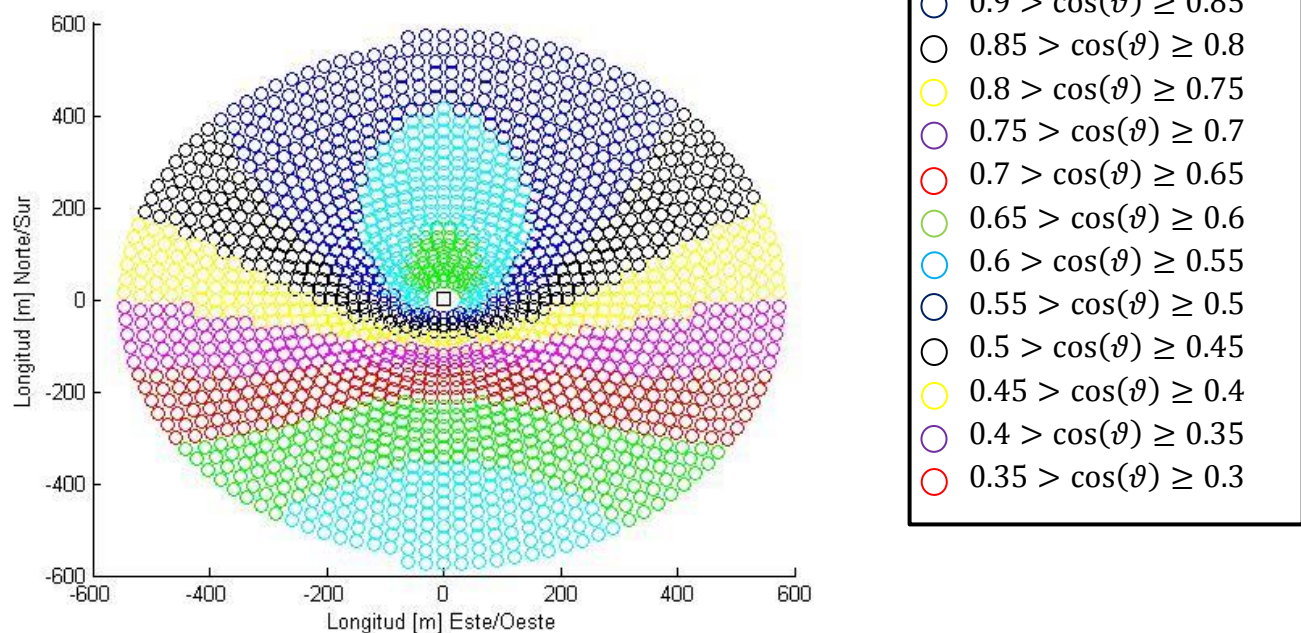


Figura 50: Campo de heliostatos coloreados según su factor coseno en abril generado por Matlab

Número de día	105
Factor coseno medio	0.7773

Tabla 20: Resultados del factor coseno en abril

15 de mayo

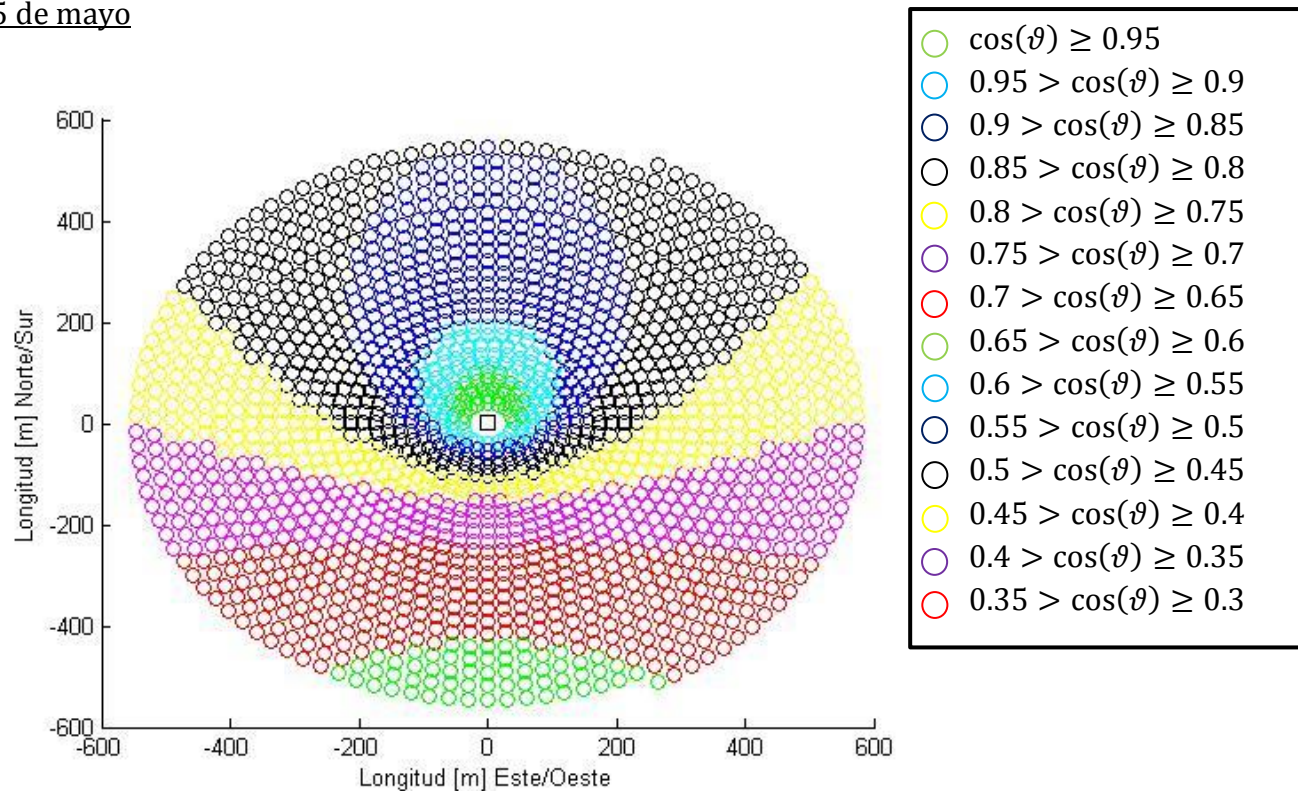


Figura 51: Campo de heliostatos coloreados según su factor coseno en mayo generado por Matlab

Número de día	135
Factor coseno medio	0.7871

Tabla 21: Resultados del factor coseno en mayo

15 de junio

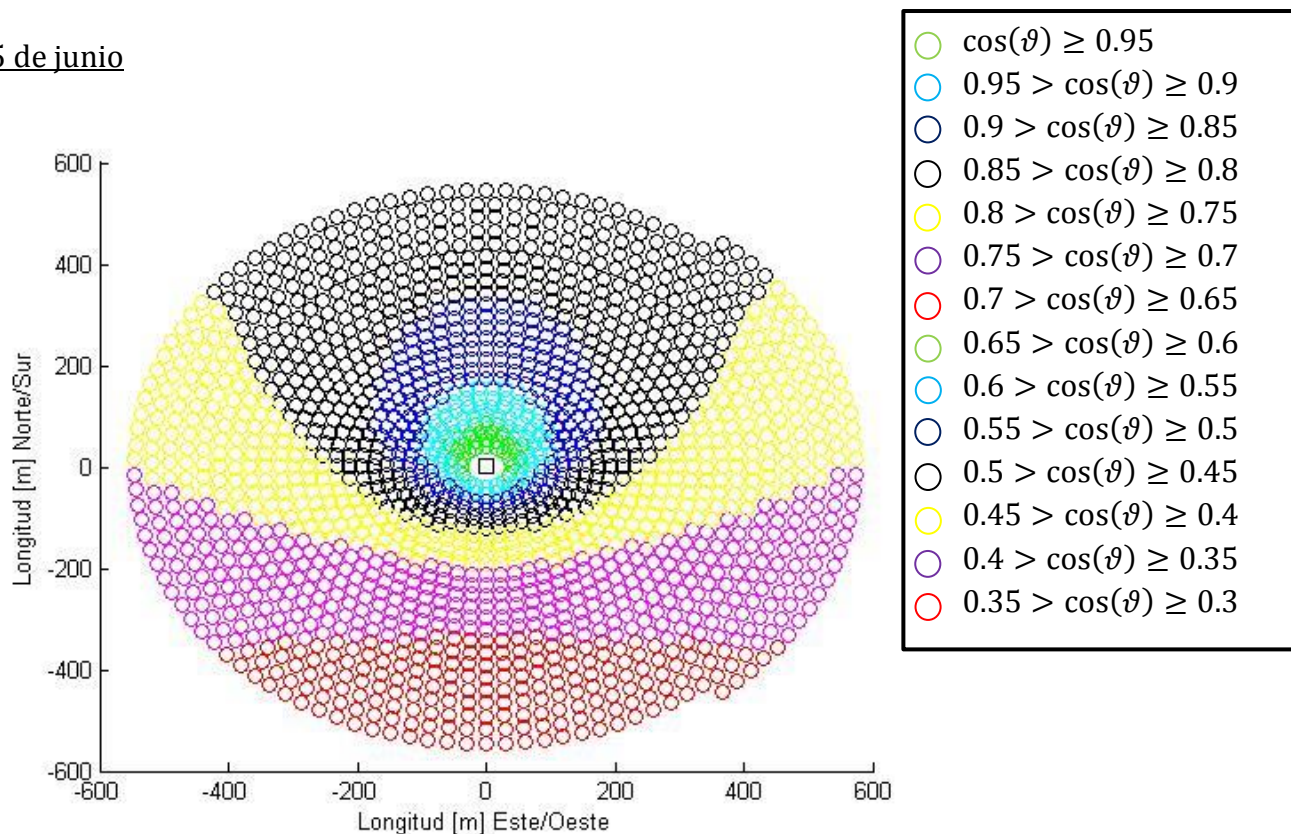


Figura 52: Campo de heliostatos coloreados según su factor coseno en junio generado por Matlab

Número de día	166
Factor coseno medio	0.7907

Tabla 22: Resultados del factor coseno en junio

15 de julio

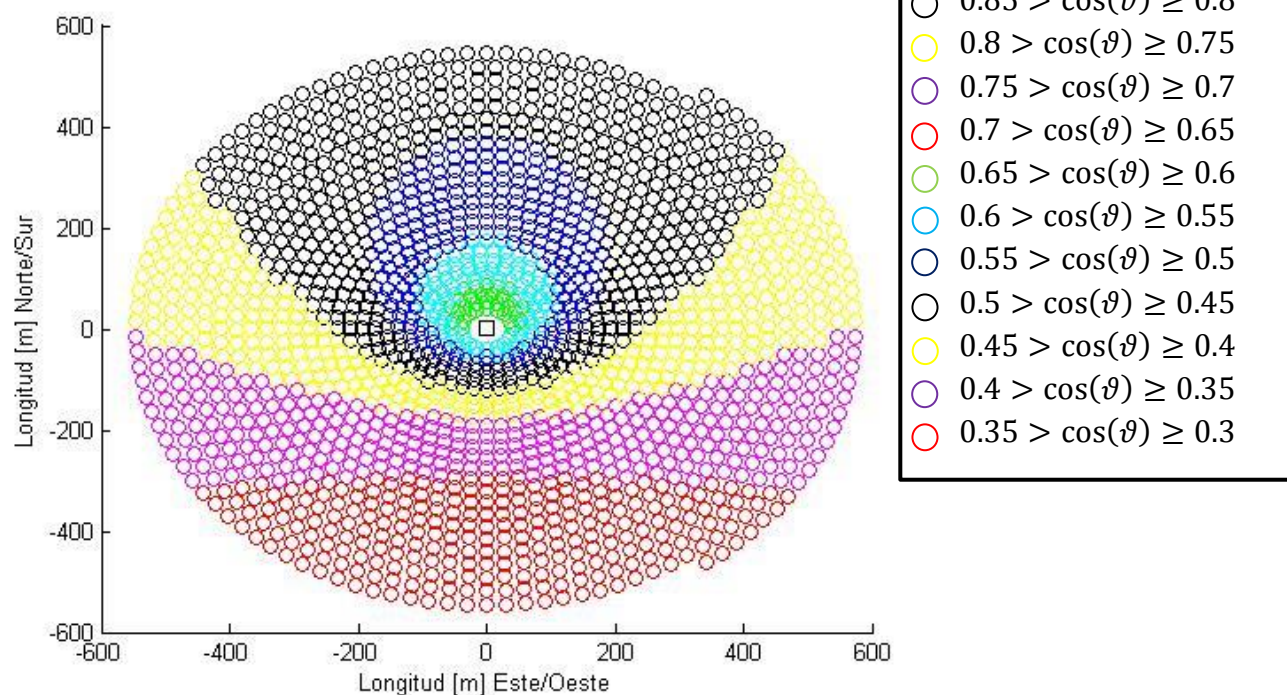


Figura 53: Campo de heliostatos coloreados según su factor coseno en julio generado por Matlab

Número de día	196
Factor coseno medio	0.7895

Tabla 23: Resultados del factor coseno en julio

15 de agosto

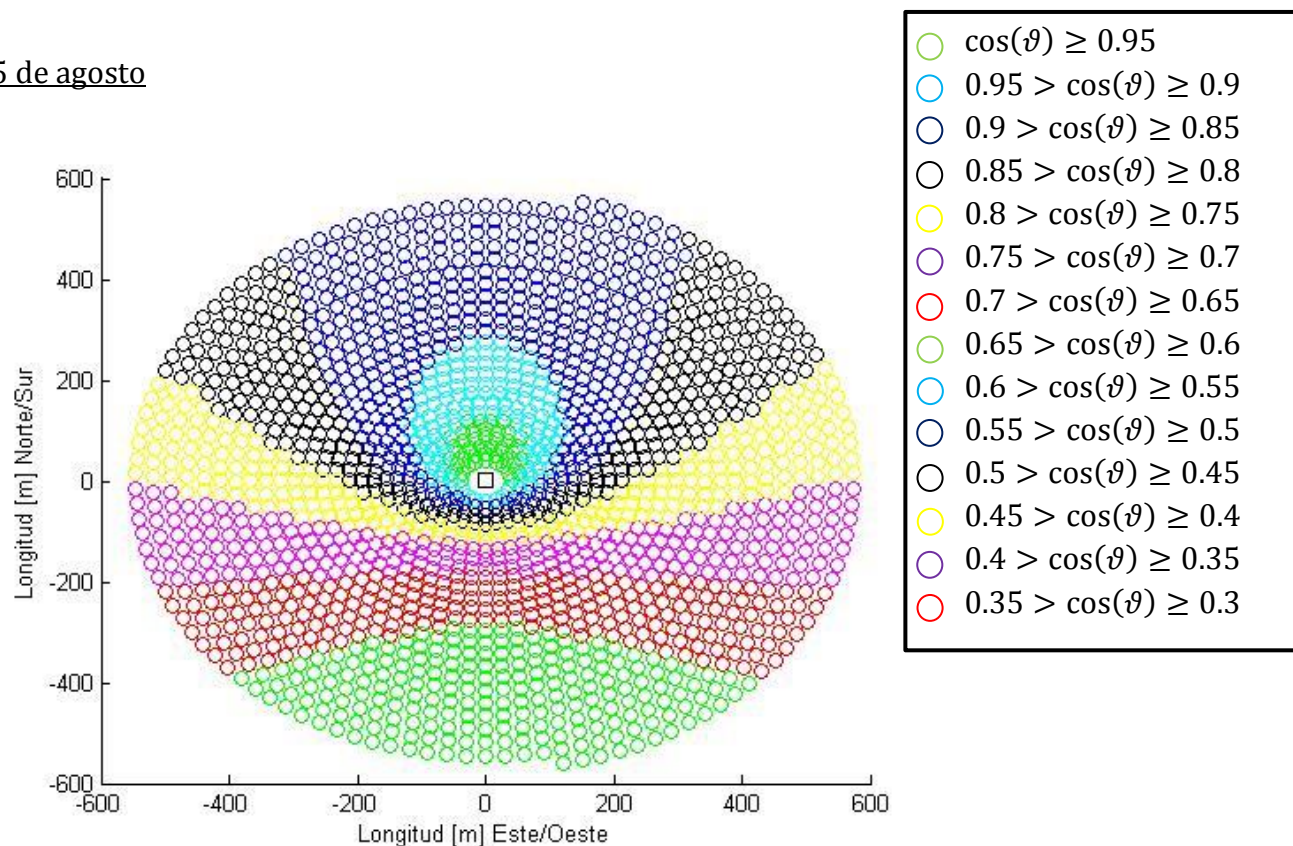


Figura 54: Campo de heliostatos coloreados según su factor coseno en agosto generado por Matlab

Número de día	227
Factor coseno medio	0.7827

Tabla 24: Resultados del factor coseno en agosto

15 de septiembre

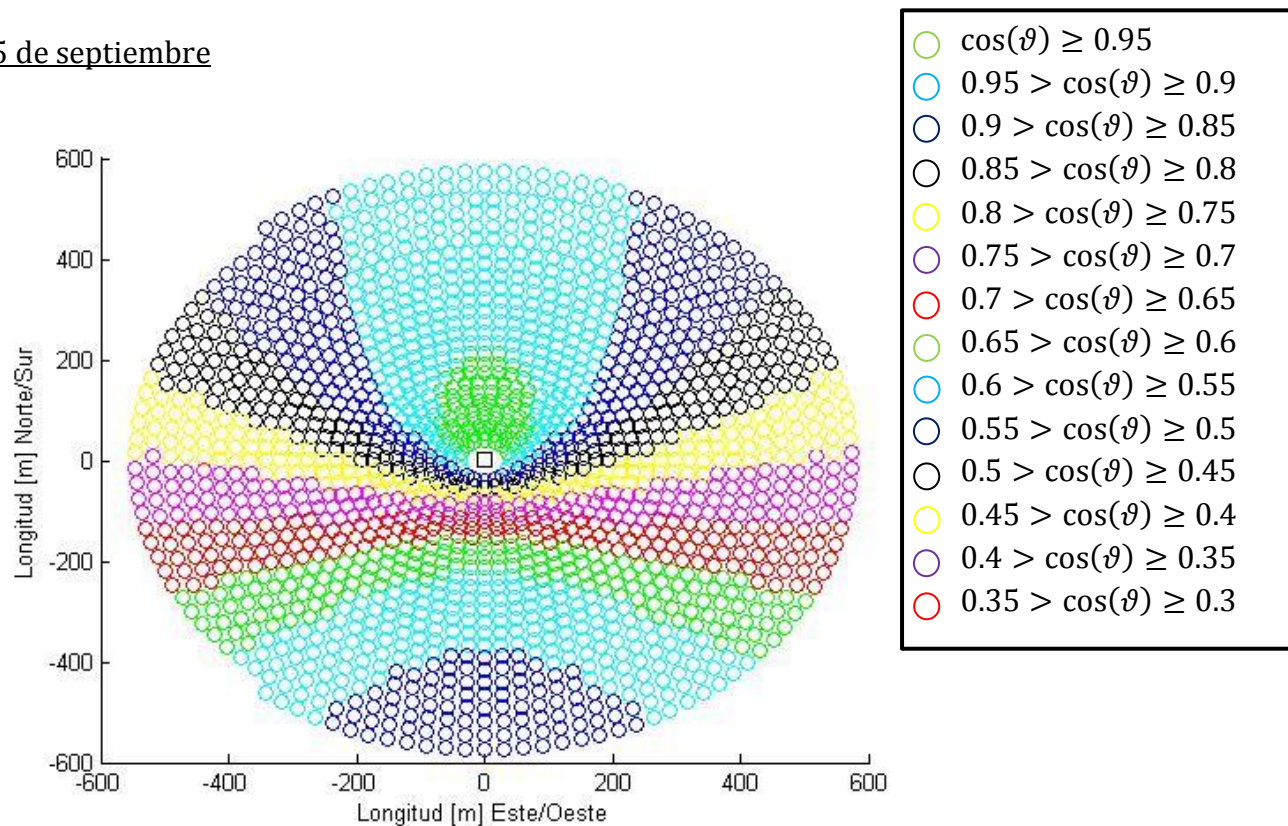


Figura 55: Campo de heliostatos coloreados según su factor coseno en septiembre generado por Matlab

Número de día	258
Factor coseno medio	0.7683

Tabla 25: Resultados del factor coseno en septiembre

15 de octubre

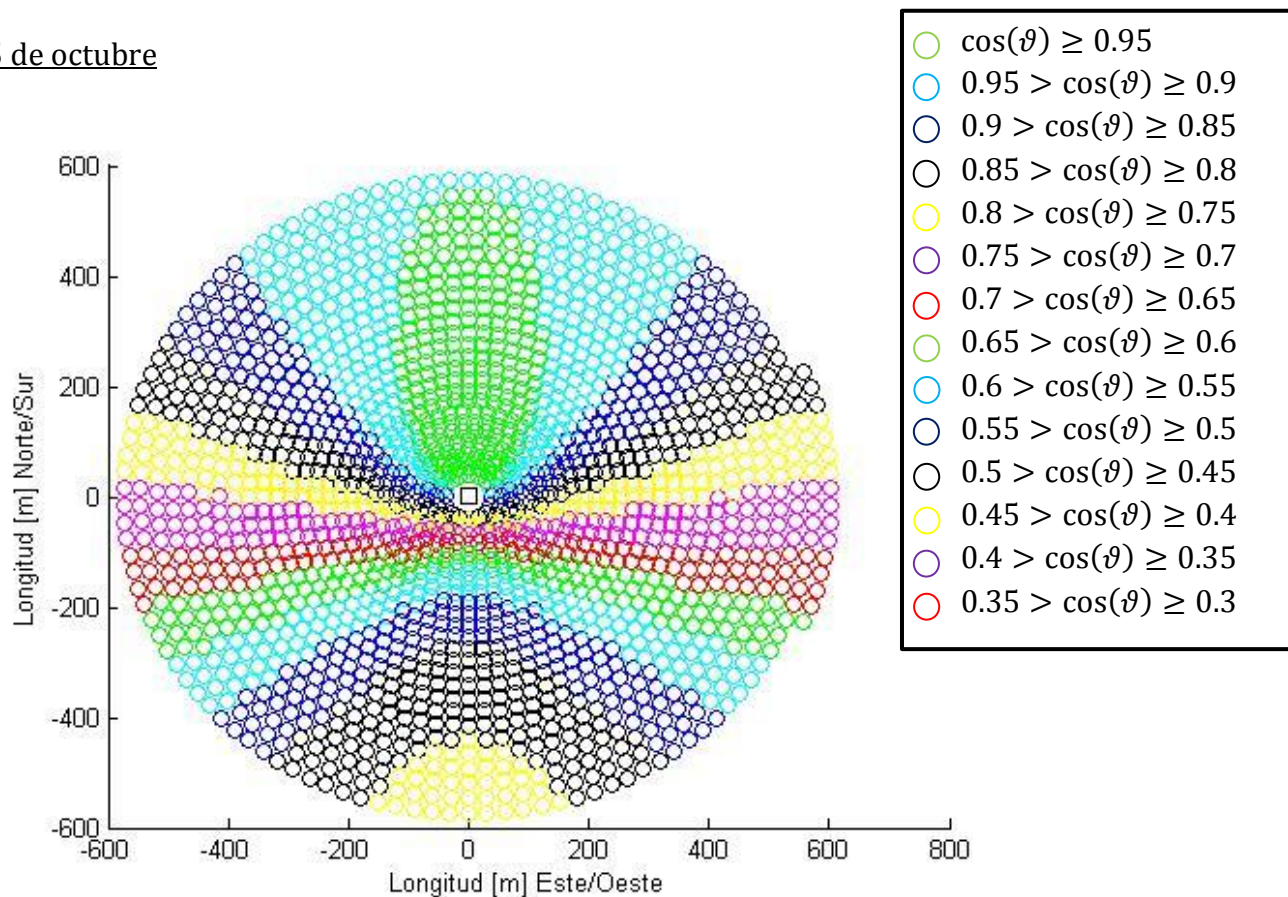


Figura 56: Campo de heliostatos coloreados según su factor coseno en octubre generado por Matlab

Número de día	288
Factor coseno medio	0.7490

Tabla 26: Resultados del factor coseno en octubre

15 de noviembre

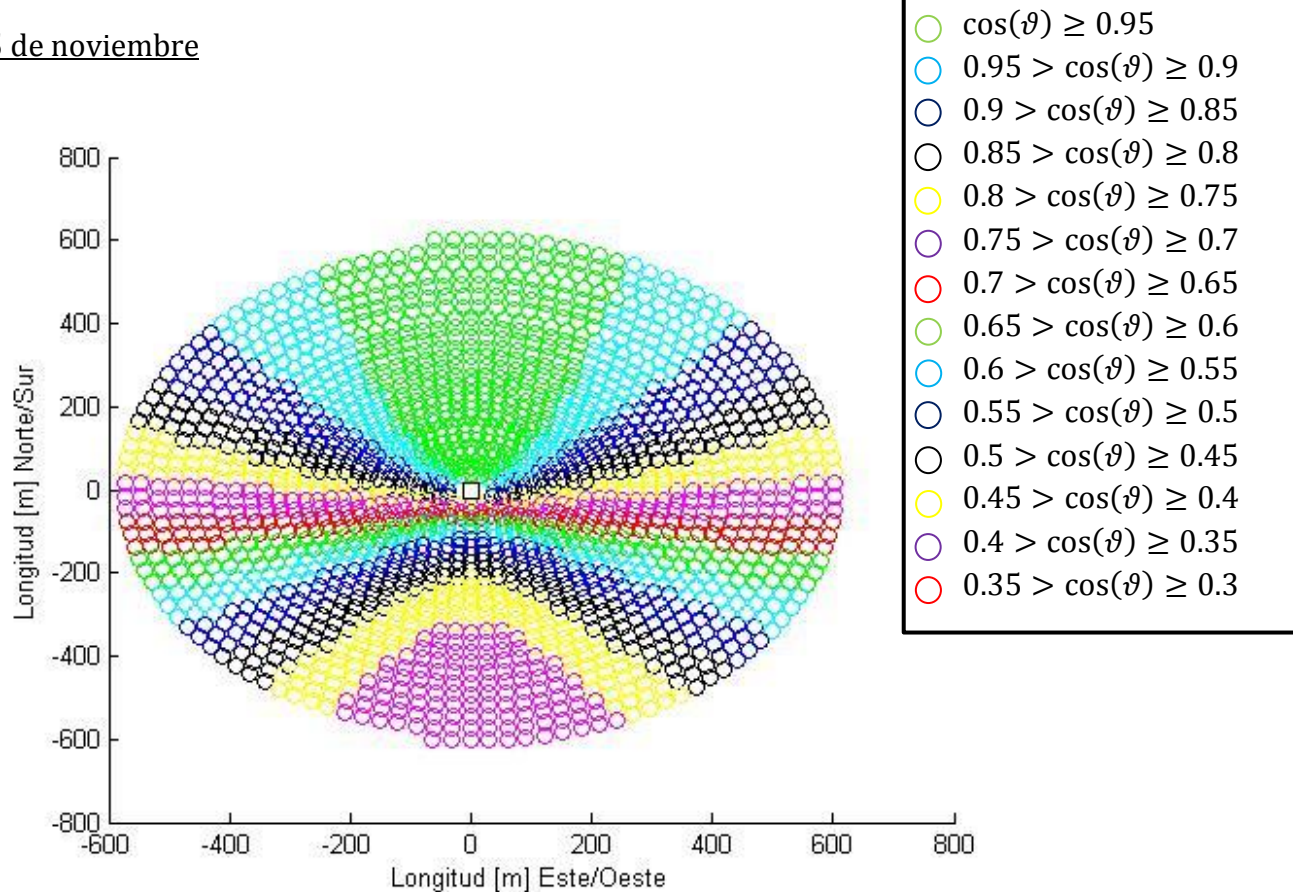


Figura 57: Campo de heliostatos coloreados según su factor coseno en noviembre generado por Matlab

Número de día	313
Factor coseno medio	0.7288

Tabla 27: Resultados del factor coseno en noviembre

15 de diciembre

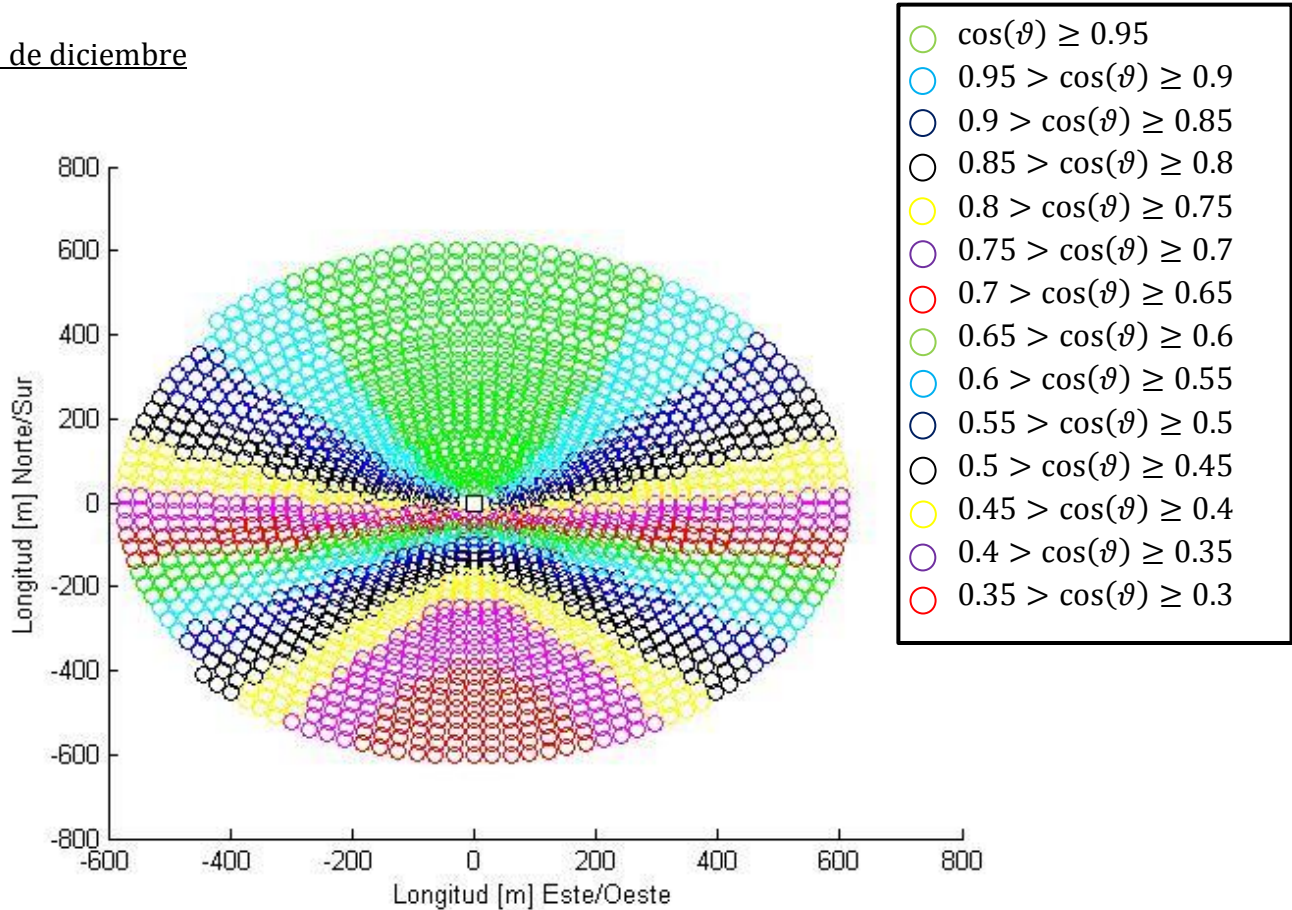


Figura 58: Campo de heliostatos coloreados según su factor coseno en diciembre generado por Matlab

Número de día	349
Factor coseno medio	0.7183

Tabla 28: Resultados del factor coseno en diciembre

Como se puede observar no existe una gran diferencia en el factor coseno en función de la época del año, ya que este oscila entre aproximadamente 0.72 y 0.79, lo que en el total no supone un cambio significativo. Por ello el mes en que se encuentre no tendrá un gran efecto en la eficiencia total de los heliostatos.



Sin embargo en los meses estivales sería necesario desenfocar algunos heliostatos para evitar quemar el receptor.

Puede verse que el efecto coseno cumple los mismos patrones que el resto de eficiencias. El efecto coseno es mayor en los heliostatos ubicados al sur, por su posición favorable a la hora de recibir los rayos solares, y es mayor cuanto más próximo se encuentra el heliostato al receptor.

Por otra parte, debe controlarse el valor de temperatura de los tubos del receptor y de la velocidad de la sal que los atraviesa. Los datos se recogen en la tabla 29.

Tabla 29
Resultados del receptor

T_t	609°C
\dot{m}_s	124 kg/s
v	1.13 m/s

El valor de la temperatura es aceptable, por lo que no debería generar problemas en los tubos. Además, como se ha dicho anteriormente, la velocidad en los tubos no debe superar los 2 m/s, y se muestra que el valor obtenido se encuentra dentro del intervalo razonable.





8. Análisis económico y de impacto ambiental

8.1. Análisis económico

En el análisis económico de la planta debemos tener en cuenta los siguientes factores:

- Inversiones en maquinaria e instalaciones.
- Vida útil de la instalación y periodo de amortización.
- Ingresos, tanto por la venta de agua como por la electricidad generada.

SUBSISTEMA RECEPTOR

Tabla 30

Resumen económico del subsistema receptor

Receptor	42.000.000€
Construcción de la torre	15.000.000€
Instalación heliostatos	80.000.000€
Compra de terrenos	2.000.000€
Cableado y material auxiliar	14.000.000€
Montaje instalación	12.000.000€
TOTAL	165.000.000€

SUBSISTEMA RECEPTOR

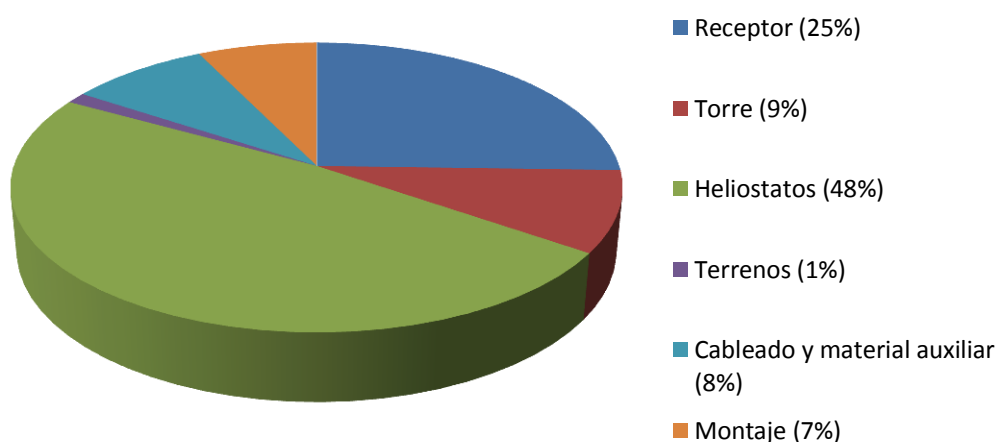


Gráfico 18: Resumen económico del subsistema receptor



CICLO DE LA SAL

Tabla 31

Resumen económico del ciclo de sal

Tanques de sal	25.000.000€
Sal fundida	30.000.000€
Intercambiador de calor	4.000.000€
TOTAL	59.000.000€

CICLO DE LA SAL

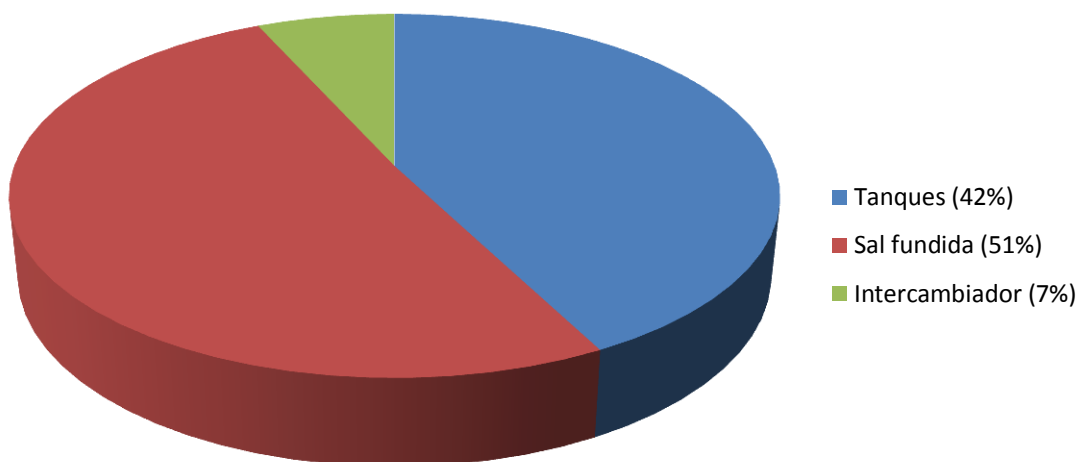


Gráfico 19: Resumen económico del ciclo de sal



CICLO RANKINE

Tabla 32

Resumen económico del ciclo Rankine

Turbina contrapresión	2.000.000€
Bomba	1.500.000€
Red de tuberías	500.000€
TOTAL	4.000.000€

CICLO RANKINE

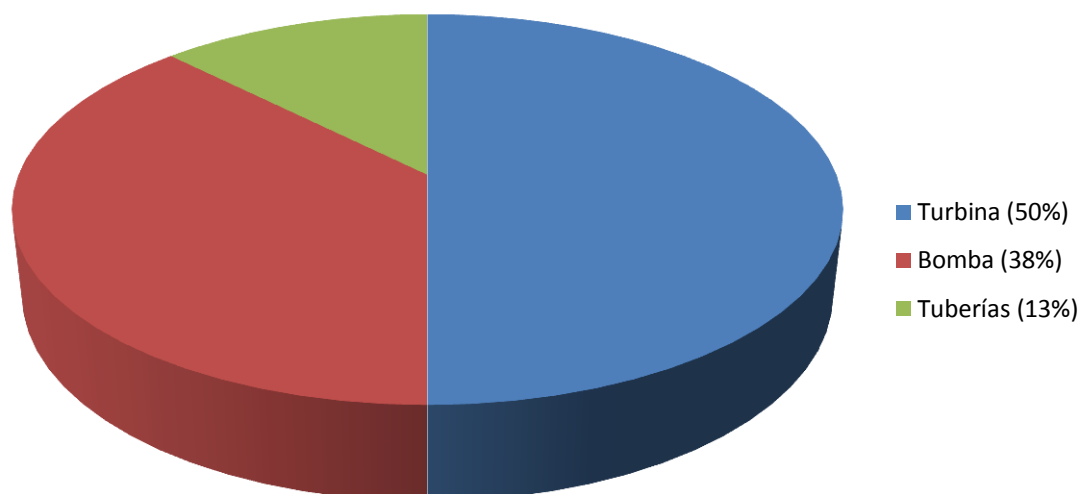


Gráfico 20: Resumen económico del ciclo Rankine

CICLO DE DESALINIZACIÓN

Tabla 33

Resumen económico del ciclo de desalinización

Evaporadores	28.000.000€
Condensador	2.000.000€
Red tuberías+bomba	500.000€
TOTAL	30.500.000€

Ciclo MED

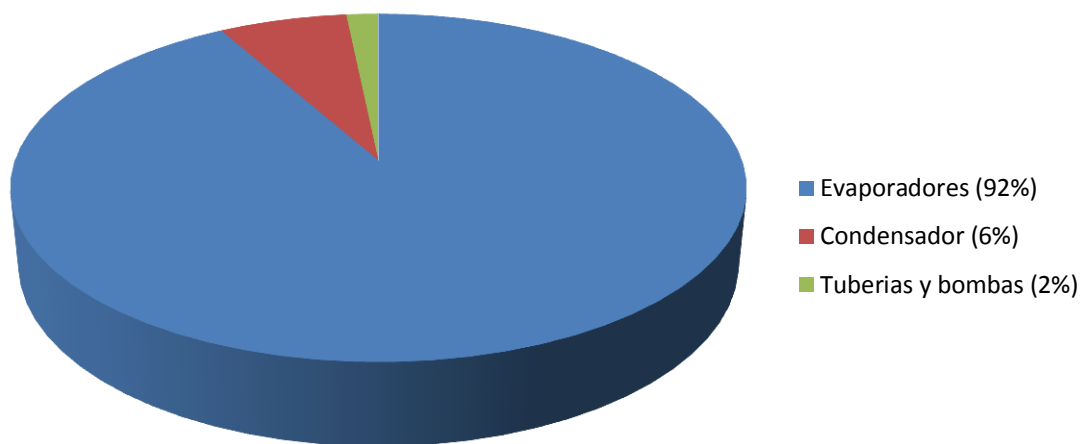


Gráfico 21: Resumen económico del ciclo de desalinización

Tras este resumido análisis económico, se puede comparar el coste de los distintos subsistemas.

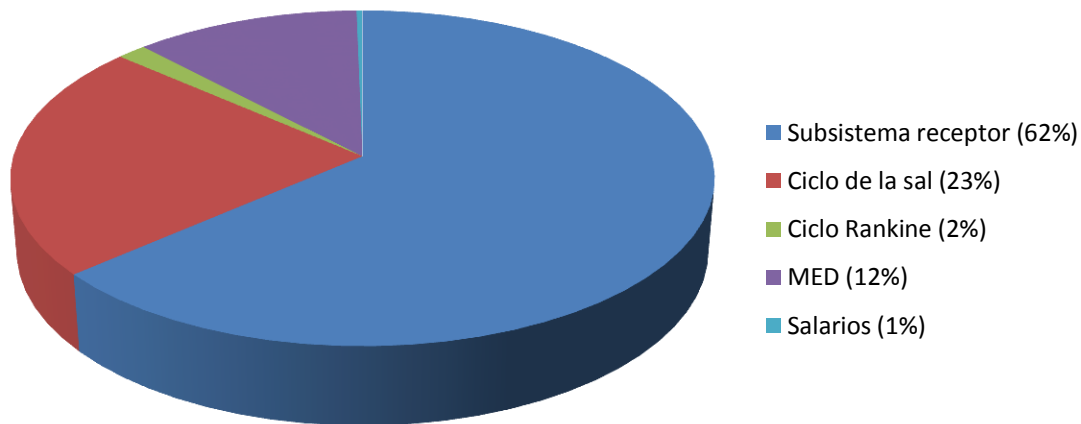


Gráfico 22: Desglose económico por subsistemas

La mayor parte de la inversión a realizar va dedicada al subsistema receptor, necesario para obtener la energía solar, como se puede observar en el gráfico 22.

Es por ello que éste debe diseñarse con sumo cuidado para operar en óptimas condiciones y evitar el sobredimensionamiento.

También ha de realizarse una inversión significativa en el ciclo de sal, necesaria para el almacenamiento térmico. Esto se debe principalmente al elevado precio de la sal fundida, de la que necesitaremos unas 30000 toneladas, y también del coste de instalación de los tanques.

Por último, se hará un balance muy sencillo para calcular el VAN del proyecto, y lo tomaremos como criterio para valorar su viabilidad económica.



Tabla 34

Análisis simplificado del VAN. Datos en millones de euros.

Año	0	1	2	3	4	5	6
Inversión	-259,30						
Amortización		-8,64	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64
Salarios		-0,79	-0,79	-0,79	-0,79	-0,79	-0,79
Flujo de caja		43,04	40,61	38,31	36,14	34,09	32,16
VAN	-259,30	-225,69	-194,51	-165,64	-138,93	-114,27	-91,53
	7	8	9	10	11	12	13
	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64
	-0,79	-0,79	-0,79	-0,79	-0,79	-0,79	-0,79
	30,34	28,63	27,01	25,48	24,03	22,67	21,39
	-70,62	-51,43	-33,85	-17,81	-3,20	10,04	22,00
	15	16	17	18	19	20	21
	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64
	-0,79	-0,79	-0,79	-0,79	-0,79	-0,79	-0,79
	19,04	17,96	16,94	15,98	15,08	14,23	13,42
	42,36	50,88	58,40	64,95	70,60	75,39	79,38
	23	24	25	26	27	28	29
	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64
	-0,79	-0,79	-0,79	-0,79	-0,79	-0,79	-0,79
	11,94	11,27	10,63	10,03	9,46	8,93	8,42
	85,13	86,97	88,16	88,76	88,79	88,29	87,28
							85,79

Como puede observarse en la tabla 33, a partir del año 12 el valor actual neto comienza a ser positivo. El VAN al final de la vida útil de la central, fijada en 30 años, es de 85,79 millones, y el ratio del VAN/Inversión es del 33.085%, por lo que puede concluirse que el proyecto es económicamente viable.

En el flujo de caja se incluye la venta del agua destilada así como de la electricidad generada.

Por último, se calculará el precio del kWh y del litro de agua. En 30 años, se estima que la central generará unos 396 GWh. Además, se sumará el dinero en salarios (23.7 millones) y un 5% de gastos de mantenimiento. Así, se obtendría un valor de **0.75 €/kWh**. Este valor no es nada rentable, pero esto se debe a que el objetivo de nuestra central no es generar electricidad. Del mismo modo, calculando el número de litros producidos al año, el gasto sería de **0.011 €/l**. Este valor si es bastante



rentable, por lo que se tiene una nueva prueba de la viabilidad económica de la central.

8.2. Impacto ambiental

Dado que la central funciona con energía renovable, otro punto importante es estudiar la cantidad de kilogramos de CO₂ que se evitará emitir, es decir, los que emitiría una central tradicional con las mismas características.

En este análisis se incluyen solo las emisiones generadas durante la operación de la central, ignorando, por ejemplo, las que deberían realizarse para la construcción de la central.

El Plan de Energías Renovables en España para los años 2005-2010 indica que las emisiones de este tipo de centrales para la producción de electricidad es de 372 toneladas de CO₂/GWh.

Nuestra central no está pensada para la generación de electricidad, y solo genera 13.2 GWh al año, suponiendo ideal el generador. Por lo tanto, el ahorro de emisiones a la atmósfera es de **4910,4 toneladas de CO₂ al año**.

En la desalinización de agua, se necesita una energía anual de $3.47 \cdot 10^8$ MJ. La gasolina libera unos 40.68 MJ por cada kg que intervenga en la combustión, de forma que en un año se necesitarían 8530 toneladas para operar nuestra central. Por cada kg de gasolina se emiten unos 3.09 kg de CO₂, por lo que el ahorro de emisiones en la desalinización de agua es de unas **26358 toneladas de CO₂ al año**.

De manera que, en total, el ahorro de emisiones que implicaría el uso de energía renovable sería de **31268 toneladas de CO₂** por cada año de operación.



DISEÑO Y ANÁLISIS TÉRMICO DE UNA PLANTA DESALINIZADORA SOLAR DE TORRE DE
CONCENTRACIÓN



9. Conclusiones



9.1. Análisis de los principales resultados

Se ha llevado a cabo el diseño de la planta en base a diferentes plantas, sobre todo la central de Gemasolar y la de la Plataforma Solar de Almería. Este diseño se ha llevado a cabo combinando datos obtenidos de estudios anteriores y con los cálculos obtenidos gracias al software Matlab.

El objetivo principal era el de diseñar una central grande, que pudiera abastecer pequeñas poblaciones de agua potable, y hacerlo de la manera más eficiente posible.

Se han intentado reproducir los resultados de la central piloto de Almería para comprobar la veracidad del modelo matemático generado. Los resultados obtenidos demuestran que éste es válido para el diseño, aunque existen diferencias notables en algunos valores debido a las simplificaciones asumidas en los cálculos.

A continuación se debe llevar a cabo un análisis de los principales resultados:

- El proceso de optimización ha servido para diseñar una central con una gran capacidad de desalinizar agua. Para ello se ha requerido de evaporadores de gran tamaño, lo que encarece el coste de la planta desalinizadora.
- Fijando el número de efectos en 16, se ha conseguido obtener una central capaz de desalinizar 2.500.000 l/d con un GOR de 11.44, un valor bastante aceptable de la eficiencia del sistema. Aunque son valores aceptables, en algunas centrales se han tomado valores experimentales incluso mejores a estos obtenidos teóricamente.
- La temperatura de vapor que entra por el primer efecto debe ser lo más alta posible, ya que de este modo aumentará la eficiencia del sistema.
- La temperatura de alta del ciclo Rankine es de 535°C, de manera que el intercambiador de calor sal-vapor puede funcionar correctamente. Al tomar un valor de la temperatura de baja del ciclo alta, la producción de energía de la turbina disminuye.
- El rendimiento de los heliostatos no muestra una gran variación a lo largo del año. Debe seleccionarse un punto de diseño intermedio que asegure que el campo no se sobredimensione y que permita operar la central a lo largo de todo el año.
- Al aumentar el número de heliostatos del campo, la potencia de la central es mayor, pero la eficiencia media de los heliostatos va disminuyendo, debido a que cuanto más lejos se encuentran, es menor la cantidad de luz reflejada que incide directamente en el receptor.



9.2. Estimación del coste del proyecto

La estimación del coste del proyecto se basa en los recursos informáticos que se han utilizado, en las horas de ingeniero junior empleadas para el desarrollo del mismo y en las horas de asesoramiento de ingeniero senior.

En gastos generales se han incluido desplazamientos, electricidad consumida, dietas y otros gastos de ese tipo. Se ha considerado como aproximadamente el 20% del coste total del proyecto.

Concepto	Cantidad	€/u	Coste (€)
Ingeniero junio	1000 horas	15€	15000€
Ingeniero senior	8 horas	100€	800€
Ordenador de mesa	1 unidad	1500€	1500€
Licencias software	2		
-Matlab	1	2000€	2000€
-Cyclepad	1	Gratuita	
Gastos generales			4000€
TOTAL			23300€

9.3. Crítica a los resultados

En este proyecto, los resultados se han obtenido de atrás hacia delante para facilitar el desarrollo del mismo. En general los resultados son bastante coherentes y similares con otros proyectos realizados con anterioridad. En la realización de los mismos, y con el objetivo de dotarles de esta coherencia, se ha partido de distintas suposiciones tenidas en cuenta anteriormente en distinta bibliografía referente a la temática de estudio.

Sin embargo, se han tomado ciertas hipótesis para simplificar los cálculos. Esto hace que algunos de los resultados obtenidos no sean totalmente precisos, y en una segunda fase, que no es objeto de estudio de este proyecto, se debería trabajar en ello para que el análisis fuera más parecido a la central que se va a construir.

En el ciclo de desalinización se ha elaborado un modelo matemático bastante completo, pero se han despreciado el efecto de diversos componentes, como los precalentadores o las cámaras flash, lo que ha conllevado a que los resultados



obtenidos en cada efecto no coincidan con lo que debería suceder en la realidad. Sin embargo, los resultados globales del proceso son bastante coherentes si se comparan con otras plantas de características parecidas.

El diseño del campo solar se ha realizado de la manera más sencilla posible, dado que no era uno de los objetivos principales del proyecto. La eficiencia de los heliostatos es relativamente baja, y en el siguiente apartado se expondrá como se podría haber mejorado.

9.4. Líneas futuras de estudio

Este proyecto ha tenido como objetivo principal estudiar las distintas alternativas para la desalinización de agua del mar y realizar un sencillo diseño de funcionamiento de una planta, incluyendo los cálculos de la obtención de la energía necesaria y de los sistemas intermedios.

La limitación en el tiempo para la entrega ha hecho que se hayan tenido que simplificar varias partes del proyecto. En una segunda parte del proyecto deberían introducirse distintas mejoras:

- Introducir un sistema de obtención de energía híbrido, que disminuiría la dependencia energética. Del mismo modo se podría utilizar un sistema de desalinización híbrido RO-MED, que dificulta los cálculos pero obtiene mejores resultados.
- Trabajar con el sistema expuesto en la introducción MED/VC, que es el que más se está desarrollando actualmente.
- Evitar simplificaciones en el ciclo de desalinización, incluyendo en los cálculos tanto los precalentadores como las cámaras flash, y obteniendo resultados más precisos.
- Reducir costes en el sistema de desalinización igualando las áreas de todos los evaporadores, aunque aumente la diferencia de temperatura entre ellos.
- Mejorar la disposición de los heliostatos, ya que en la disposición circular los de los radios más alejados del receptor tienen una eficiencia muy baja. Para que el diseño fuese más eficiente deberían quitarse heliostatos de los radios más exteriores de la dirección norte, menos eficiente, para colocarse lo más al sur posible.



REFERENCIAS

- [1] S. Kalogirou, *Solar energy engineering: Processes and systems*, 2009.
- [2] J. Saghir et al, *Urban water and Sanitation in the Middle East and North Africa Region: The Way Forward*, The World Bank, Middle East and North Africa Region, Infrastructure Development Group, 2000.
- [3] Ministerio de Educación, Gobierno de Chile. Recurso online <http://www.curriculumenlineamineduc.cl/605/w3-propertyvalue-62248.html> [Último acceso: 21/07/16 13:58].
- [4] U. Caldera et al, *Local cost of seawater RO desalination based on solar PV and wind energy: A global estimate*, 2016.
- [5] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, *Managing Water under Uncertainty and Risk*, The United Nations World Water Development Report 4 Volume 1, 2012.
- [6] M. Isaka, *Water Desalination Using Renewable Energy*, 2012.
- [7] Next Big Future, *Desalination Water World*, 2013. Recurso online <http://nextbigfuture.com/2013/10/desalination-water-world.html>. [Último acceso: 21/07/16 14:21].
- [8] Global Water Intelligence, *Desalination market in Algeria to reach \$1,058.3m by 2016-New GWI Report*. Recurso online <http://www.skyscrapercity.com/>. [Último acceso: 21/07/16 14:24].
- [9] S. Kalogirou, *Survey of solar desalination systems and system selection*, 1997.
- [10] P. Palenzuela, *Characterisation of the coupling of multi-effect distillation plants to concentrating solar power plants*, 2015.
- [11] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2007: Synthesis Report*, Suisse: GIEC Publication: 2008.
- [12] El club de la energía, *La energía eléctrica, Central solar*. Recurso online <http://elclubdelaenergia.blogspot.com.es/p/central-solar.html>. [Último acceso: 21/07/16 14:30].
- [13] H. L. Zang et al, *Concentrated solar power plants: Review and design methodology*, 2013.
- [14] H. Joga, Proyecto Fin de Carrera, *Diseño de una Planta Termosolar de Receptor Central con Almacenamiento de Sales Fundidas*, Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [15] S. Kuravi et al, *Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants*, Progress, Energy Combust. Sci. 39 2013.



-
- [16] J. C. Gómez-Vidal, R. Tirawat, *Corrosion of alloys in a chloride molten salt (NaCl-LiCl) for solar thermal technologies*, National Renewable Energy Laboratory, Denver, USA, 2016.
- [17] C. Montanes et al, *Analysis of CSP plants for the definition of energy policies: the influence on electricity cost of solar multiples, capacity factors and energy storage*, 2010.
- [18] H. Lu et al, *Desalination coupled with salinity-gradient solar ponds*, 2000.
- [19] U. S. Department of the Interior, *Thermal Desalination using MEMS and Salinity-Gradient Solar Pond Technology*, University of Texas at El Paso, El Paso, Texas, Report No. 80, 2002.
- [20] A. Álvarez, *Tesis: Análisis de una planta desaladora de eme con un estanque solar como fuente de energía*, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [21] A. Razaee Jordehi, *Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: A review*, 2016.
- [22] A. A. Mas'ud et al, *A review on the recent progress made on solar photovoltaic in selected countries of sub-Saharan Africa*, 2016.
- [23] A. Ummadisingu, M. S. Soni, *Concentrating solar power – Technology, potential and policy in India*, 2011.
- [24] D. Watts et al, *Assessment of wind energy potential in Chile: A project-based regional wind supply function approach*, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, 2016.
- [25] Asociación Empresarial Eólica, *Evolución anual y acumulada de la potencia eólica instalada:1998-2010*. Recurso online: <http://www.aeeolica.org/>. [Último acceso: 21/07/16 14:48].
- [26] Comisión de Salud Laboral, 2014. Recurso online: <https://afusecsalud.wordpress.com>. [Último acceso: 21/07/16 14:50].
- [27] A. W. Dahmouni et al, *Assessmet of wind energy potential and optimal electricity generation in Borj-Cedria, Tunisia*, 2010.
- [28] E. Barbier, *Geothermal energy technology and current status: an overview*, Renew Sustain Energy, 2002.
- [29] J. W. Lund, T. L. Boyd, *Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review*, Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, 2016.
- [30] T. B. Johanson et al, *Renewable fuels and electricity for a growing world economy: defining and achieving the potential*, 1993.
- [31] Universidad Carlos III de Madrid, *Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Máquinas y Centrales Térmicas*, 2015.
- [32] D. W. Oxtoby et all, *Principles of Modern Chemistry*, Sixth Edition, 2008.



- [33] Atomic archive, Nuclear Fission: Basics. Recurso online: <http://www.atomicarchive.com/Fission/Fission1.shtml> . [Último acceso: 21/07/16 16:43].
- [34] A. Barak et al, *Experiencias, necesidades y perspectivas en torno a la desalinización nuclear. Una reseña sobre las plantas de demostración y los estudios recientes*, 1990.
- [35] C. Craig, *Nuclear Desalination: A Proven Technology Whose Time Has Come*, 2006.
- [36] S. W. Sharshir et al, *Factors affecting solar stills productivity and improvement techniques: A detailed review*, 2016.
- [37] F. F. Tabrizi, *Experimental study of a cascade solar still coupled with a humidification-dehumidification system*, 2016.
- [38] E. Mathioulakis, *Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art*, National Center for Scientific Research (NCSR), Athens, Greece, 2006.
- [39] A. Aminian, *Prediction of temperature elevation for seawater in multi-stage flash desalination plants using radial basis function neural network*, School of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Semnan University, Iran, 2010.
- [40] M.A. Darwish, A. Alsairafi, *Technical comparison between TVC/MEB and MSF*, Mechanical Engineering Department, Kuwait University, 2004.
- [41] C. Frantz, B. Seifert, *Thermal analysis of a multi effect distillation plant powered by a solar tower plant*, 2015.
- [42] MEDRC R&D, Report, *Matching Renewable Energy with Desalination Plants*, IT Power Ltd, 2001.
- [43] Y. Yang et al, *Performance analysis of combined humidified gas turbine power generation and multi-effect thermal vapor compression desalination systems Part 1: the desalination unit and its combination with a steam-injected gas turbine power system*, Desalination 196, 2006.
- [44] P. Palenzuela et al, *Large-scale solar desalination by combination with CSP: Techno-economic analysis of different options for the Mediterranean Sea and the Arabian Gulf*, 2014.
- [45] G. Iaquaniello et al, *Concentrating solar power (CSP) system integrated with MED-RO hybrid desalination*, Desalination 336, 2014.
- [46] P. Brewer, ACWA Service Limited, *The key to efficient RO desalination*, 2016.
- [47] A. Pérez-González et al, *State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates*, 2011.



- [48] Agua Bona, Ósmosis inversa y descalcificadores, Recurso online: <http://www.aguabona.com/osmosis.jsp>. [Último acceso: 21/07/16 16:55].
- [49] S. S. Shenvi et al, *A review on RO membrane technology: Developments and challenges*, 2015.
- [50] S. Burn et al, *Desalination techniques-a review of the opportunities for desalination in agriculture*, Desalination 364, 2015.
- [51] N. Ghaffour et al, *Technical review and evaluation of the economics of water desalination: current and future challenges for better water supply sustainability*, Desalination 309, 2013.
- [52] P. Kuntz, *A Handbook For Solar Central Receiver Design*, Sandia National Laboratories, Livermore, 1986.
- [53] F. Trieb, *Concentrating Solar Power for Seawater Desalination*, 2007.
- [54] Google Maps.
- [55] DLR, Institute of Solar Research, CIEMAT Plataforma Solar de Almería-Europe's biggest Test Center for Concentrating Solar Power (CSP), Recurso online: http://www.dlr.de/sf/en/desktopdefault.aspx/tabid-7176/11942_read-28189/. [Último acceso: 21/07/16 17:21].
- [56] A. B. Amer, *Development and optimization of ME-TVC desalination system*, Desalination, no. 249, pp. 1315-1331, 2009.
- [57] A. Ophir, F. Lokiec, *Advanced MED process for most economical sea water desalination*, Desalination 182 (2005) 187-198.
- [58] M. A. Darwish et al, *Energy consumption in equivalent work by different desalting methods case study for Kuwait*, Desalination 152(2000) 83-92.
- [59] T. Michels, *The modern MED pursuing its way in the Gulf Region*, European Desalination Society, Newsletter 11 January 2001.
- [60] H. El-Dessouky, H. Ettouney, *Fundamentals of salt water desalination system*, Elsevier Science B.B, 2002.
- [61] M. Torres, *La desalación de agua de mar y el vertido de la salmuera*, 2014.
- [62] P. Palenzuela et al, *Steady state model for multi-effect distillation case study: Plataforma Solar de Almería MED pilot plant*, 2014.
- [63] B. M. Fabuss, A. Korosi, *Boiling Point Elevation of Sea Water and its Concentrates*, J. Chem. Eng. Data 11(4), 606-609, 1966.
- [64] C. Fritzmann et al, *State-of-the-art of reverse osmosis desalination*, Institut für Verfahrenstechnik RWTH Aachen, Germany, 2006.
- [65] H. El-Dessouky, H. Ettouney, *Multiple effect evaporation-vapor compression desalination processes*, TranslChemE 78 (May 2000)662-676 (Part A).



- [66] Y. M. El-Sayed, R. S. Silver, *Principles of Desalination*, volume A, 2nd edition Academic Press, New York, NY, 1980.
- [67] R. K. Kamali et al, *A simulation model and parametric study of MED-TVC process*, 2008.
- [68] R. M. Felder, R. W. Rousseau, *Elementary principles of chemical processes*, Third edition, 2005.
- [69] Universidad Carlos III de Madrid, Dpto. Ingeniería Térmica y Fluidos, *1º y 2º Principios de la Termodinámica aplicados a Volúmenes de Control*, Ingeniería Térmica, 2014.
- [70] M. Moran, H. Shapiro, *Fundamentos de termodinámica técnica 2ª edición*, 2004.
- [71] Universidad Carlos III de Madrid, Dpto. Ingeniería Térmica y Fluidos, *Ciclos térmicos para producción de potencia*, Ingeniería Térmica, 2014.
- [72] Y. Çengel, A. F. Ghajar, *Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones*, Cuarta edición, 2011.
- [74] Wuxi Jinxi Heat Exchanger Co., Ltd, Professional Aluminium Heat Exchanger Supplier, Recurso online:
<http://www.plateandfinheatexchanger.com/>. [Último acceso: 21/07/16 17:35].
- [75] Universidad Carlos III de Madrid, Dpto. Ingeniería Térmica y Fluidos, *Intercambiadores de Calor*, Transferencia de calor, 2015.
- [73] Y. S. Muzychka, M. M. Yovanovich, *Laminar Flow Friction and Heat Transfer in Non-Circular Ducts and Channels Part II-Thermal Problem*, 2002.
- [76] O. A. Jaramillo, *Intercambiadores de calor*, Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.
- [77] Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, 8th edn, Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc. Tarrytown, NY, 1999.
- [78] J. W. Palen, *Shell-and-tube reboilers in Heat Exchanger Design Handbook, Vol 3*, Hemisphere Publishing Corp, New York, 1988.
- [79] R. W. Serth, *Process Heat Transfer Principles and Applications*, 2007.
- [80] TEMA Designations of Heat Exchangers.
- [81] Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Área de Ingeniería Térmica, *Transferencia de calor: Diseño y Análisis de un Intercambiador de Calor Mediante Ordenador*, 2015.
- [82] R. A. Bowman et al, *Mean Temperature Difference in Design*, 1940.
- [83] A. B. Zavoico, *Solar Power Tower, Design Basis Document*, 2001.
- [84] P. Gadea. *Proyecto Fin de Carrera: Diseño y Análisis Térmico de una Planta Termosolar de Receptor Central Situada en la Comunidad de Madrid*, Universidad Carlos III de Madrid, 2015.



-
- [85] Y. L. He, *Simulation of the parabolic trough solar energy generation system with Organic Rankine Cycle*, 2012.
- [86] D. Q. Kern, *Process Heat Transfer*, 1950.
- [87] F. Incropera, D. P. de Witt, *Fundamentos de Transferencia de Calor*, Cuarta edición, 1999.
- [88] T. M. Pavlovic et al, *A review of concentrating solar power plants in the world and their potential use in Serbia*, 2012.
- [89] F. J. Collado, *Preliminary design of surrounding heliostat fields*, Zaragoza University, Zaragoza, Spain, 2008.
- [90] A. Gómez Cristobal, *Proyecto Fin de Carrera: Diseño del Campo de Heliostatos para Torres Solares de Receptor Central*, Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos, 2011.
- [91] X. Wei et al, *A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant*, 2010.
- [92] F. J. Collado, J. A. Turégano, *Calculation of the anual thermal energy supplied by a defined heliostat field*, 1989.
- [93] A. de la Calle et al, *Dynamic modeling and simulation of a solar-assisted multi-effect distillation plant*, 2014.
- [94] M. A. Sharaf et al, *Thermo-economic analysis of solar thermal power cycles assisted MED-VC (multi effect distillation-vapor compression) desalination processes*, 2011.
- [95] Instituto Nacional de Estadística, INE, *Estadísticas e indicadores del agua*, Boletín informativo, 2008.
- [96] Área de cooperación y promoción provincial, *Informe sobre el Desierto de Tabernas, Estado actual y propuestas de actuación*, Excma. Diputación Provincial de Almería, 2006.
- [97] AK Steel, *Stainless Steel 316/316L*, Product Data Sheet, 2007.
- [98] Z. Ahmad, *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, 2006.
- [99] W. D. Callister, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, 1996.
- [100] Agencia Andaluza de la Energía, Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa, Radiación Solar. Recurso online:
<https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/Radiacion/radiacion1.php> .
[Último acceso: 31/09/16 13:44].
- [101] F. J. Collado, *Quick evaluation of the annual heliostat field efficiency*, 2007.


```
%///CICLO DE DESALINIZACIÓN MED///
```

```
clc  
clear all
```

```
%//PARÁMETROS DE ENTRADA A FIJAR//
```

```
%Temperatura media del agua de mar [K].  
%Tmar = 25; %PSA  
Tmar = 26.6;
```

```
%Temperatura de alimentación de los efectos[K].  
%Talimentacion = Tmar + 7.3 ; %PSA  
Talimentacion = Tmar + 10;
```

```
%Incremento de T entre efectos[K].  
%deltaT = (68-33.33)/13; %PSA  
deltaT = 2.25;
```

```
%Elevación del Punto de Ebullición [K]  
%BPE = 1;
```

```
%Eficiencia de los efectos  
eficiencia = 0.77;
```

```
%Caudal másico alimentación [kg/s]  
%F = 2.22 ; %PSA  
F = 157.8;
```

```
%Caudal másico de vapor [kg/s]  
%Ds = 0.0822 ;%PSA  
Ds = 5;  
%Número máXmo de efectos  
%nmax = 14;%PSA  
nmax = 16;  
n = nmax+1;
```

```
%Iteración 0  
nmaxiter = 40;  
Xf = 35000;  
Xb = 100000;  
deltaX = 0.1*Xb;  
XCaSO4 = 110000;  
BPE = zeros(1,n);  
BPEi = ones(1,n);  
iter = 0;  
mBPE = zeros (nmaxiter,n);  
mBPEi = zeros (nmaxiter,n);  
mX = zeros (nmaxiter,n);  
mX_1 = zeros (nmaxiter,n);  
X = zeros(1,n);
```

```
X_1 = zeros (1,n);
```

```
while Xb>70000 || Xb+deltaX>XCaSO4 || BPE(n) ~= BPEi(n) || X(n) ~= X_1(n) && iter <= nmaxiter
```

```
    iter = iter + 1;
```

```
    a=1;
```

```
    b=1;
```

```
    for a=iter:1:20
```

```
        for b=1:1:n
```

```
            mBPE(iter,b) = BPE(b);
```

```
            mBPEi(iter,b) = BPEi(b);
```

```
            mX(iter,b) = X(b);
```

```
            mX_1(iter,b) = X_1(b);
```

```
        end
```

```
    end
```

```
if Xb>70000
```

```
    n = n-1;
```

```
elseif Xb+deltaX>XCaSO4
```

```
    n = n-1;
```

```
end
```

```
T = zeros (1,n);
```

```
Tv = zeros (1,n);
```

```
%Temperatura ultimo efecto[°C].
```

```
%T(n) = Talimentacion + 1;
```

```
T(n) = Talimentacion + 1;
```

```
z = 1;
```

```
Tv(n) = T(n) - BPEi(n);
```

```
%Vector coeficiente global transferencia de calor [W/m2K]
```

```
U = zeros (1,n);
```

```
j = n;
```

```
for j = n:-1:1
```

```
    T(j) = T(n) + deltaT*(n-j);
```

```
    Tv(j) = T(j) - BPEi(j);
```

```
    U(j) = funcionU (T(j));
```

```
end
```

```
Ts = Talimentacion + (T(1)-Talimentacion)/eficiencia;
```

```

%//CAUDALES MÁSICOS//

%Vector de caudal de destilado[kg/s]
D = zeros (1,n);

%Vector de caudal de salmuera [kg/s]
B = zeros (1,n);

%Vector salinidad salmuera
X = zeros(1,n);

%Vector Area [m2]
A = zeros (1,n);

k = 1;
SD = 0;
%mx_1 = mx(iter,n) ;

for k = 1:1:n

    if k == 1

        D(k) = (1/(hvap(Tv(k))-hliq(T(k))))*(Ds*hevap(Ts)-(F/n)*C((T(k)+Talimentacion)
/2,Xf)*(T(k)-Talimentacion));
        B(k) = (F/n)-D(k);
        SD = SD + D(k);
        X(k) = k*(F/n)*Xf/B(k);
        %mx(iter,k) = X(k);

    elseif k == 2

        D(k) = (1/(hvap(Tv(k))-hliq(T(k))))*(D(k-1)*hevap(Tv(k-1))-(F/n)*C((T(k)
+Talimentacion)/2,Xf)*(T(k)-Talimentacion)+B(k-1)*C((T(k)+Tv(k))/2,X(k-1))*(T(k-1)-T
(k)));
        B(k) = (F/n) - D(k) + B(k-1);
        SD = SD + D(k);
        X(k) = k*(F/n)*Xf/B(k);
        %mx(iter,k) = X(k);

    else

        D(k) = (1/(hvap(Tv(k)) - hliq(T(k))))*(D(k-1)*hevap(Tv(k-1)) + SD*(hliq(Tv(k-
2)) - hliq(Tv(k-1))) - (F/n)*C((T(k)+Talimentacion)/2,Xf)*(T(k)-Talimentacion) + B(k-1)
*C((T(k)+Tv(k))/2,X(k-1))*(T(k-1)-T(k)));
        SD = SD + D(k);
        B(k) = (F/n) - D(k) + B(k-1);
        X(k) = k*(F/n)*Xf/B(k);
        %mx(iter,k) = X(k);

    end

    %mx = mx(iter,n);
end

j=1;

```

```

for j=1:1:n

    BPE(j) = BPEi(j);
    BPEi(j) = fBPE(T(j),X(j)/1000);
    X_1(j) = X(j);
    X(j) = X(j);

end

%Salinidad límite
Xb = X(k);
XCaSO4 = (411865.65 - 10173.7 * (T(1)) + 96.82 * (T(1))^2-0.325 * (T(1)^3));
deltaX = 0.1*Xb;

end
SA = 0;
Q = zeros (1,n);

for j = 1:1:n

    if j == 1

        Q(j) = Ds*(hvap(Ts) - hliq(T(j)));
        A(j) = Q(j)/(U(j)*(Ts-T(j)));
        SA = SA + A(j);

    elseif j == n

        Q(j) = (D(j-1)*hevap(Tv(j-1)) + SD*C(Tv(j),X(j))*(Tv(j-1)-Tv(j))-(j-1)*(F/n)*C
((T(j)+Talimentacion)/2,X(j))*(T(j)-Talimentacion));
        A(j) = Q(j)/(U(j)*(Tv(j-1)-T(j)));
        SA = SA + A(j);

    else

        Q(j) = (D(j-1)*hevap(Tv(j-1))-(F/n)*C((T(j)+Talimentacion)/2,X(j))*(T(j)-
Talimentacion));
        A(j) = Q(j)/(U(j)*(Tv(j-1)-T(j)));
        SA = SA + A(j);

    end
end

Dkgh = zeros (1,n);
Bkgh = zeros (1,n);

for j = n:-1:1
    Dkgh (j) = D(j)*3600;
    Bkgh (j) = B(j)*3600;

```

```

end
    GOR = SD/Ds;
    %Condensador
    Np = 2;
    D0 = 0.0254;
    LMTDc = (Tmar-Talimentacion)/log((Tv(n)-Talimentacion)/(Tv(n)-Tmar));
    Uc = (1.7194 + 3.2063e-2*Tv(n)-1.5971e-5*Tv(n)^2 + 1.9918e-7*Tv(n)^3)*1000;
    %Ac = SD*hevap(Tv(n))/(Uc*LMTDc);
    Ac = F*C((Talimentacion+Tmar)/2, Xf)*(Talimentacion-Tmar)/(Uc*LMTDc);
    Lt= 4.1;
    Nt = ceil(Ac/(Np*Lt*pi*D0));
    sA = (SA+Ac)/SD*1000/3600/13;
    Pt = 1.25*D0;
    Dcarcasa = 2*Pt*sqrt(Nt*Lt/pi);

    A_ef = SA/n;

    Lp = 1.822;
    w = 1.242;

    rho = 1000;

    nhab = ceil((SD*3600/rho*1000*13)/160);

    Np = floor(A_ef/Lp/w);
    Ai = Np*Lp*w;

    %//OPTIMIZACIÓN//
    Dopt = zeros(1,n);
    Bopt = zeros(1,n);
    Qopt = zeros(1,n);
    Topt = zeros(1,n);
    Tvopt = zeros(1,n);
    BPEopt = zeros(1,n);
    Xopt = zeros(1,n);

    %Primer valor iteración

    for j=1:1:n;

        Qopt(j) = Q(j);
        Topt(j) = T(j);
        Tvopt(j) = Tv(j);
        BPEopt(j) = BPE(j);
        Xopt(j) = X(j);
        Uopt(j) = U(j);
        Dopt(j) = D(j);
        Bopt(j) = B(j);

    end

    SDopt=0;

```

```

Toptn_1=0;
iteropt = 1;
j = 1;

while iteropt<2

    for j=n:-1:2

        if j == 1
            Dopt(j) = (1/(hvap(Tvopt(j))-hliq(Topt(j))))*(Ds*hevap(Ts)-(F/n)*C
((Topt(j)+Talimentacion)/2,Xf)*(Topt(j)-Talimentacion));
            Bopt(j) = (F/n)-Dopt(j);
            Qopt(j) = Ds*(hevap(Ts) - hliq(Topt(j)));
            SDopt = SDopt + Dopt(j);
            Xopt(j) = j*(F/n)*Xf/Bopt(j);
            BPEopt(j) = fBPE(Topt(j),Xopt(j)/1000);
            Uopt(j) = Qopt(j)/A_ef/BPE(j);
            Topt(j) = 0.185*Uopt(j)-390.815;
            Tvopt(j) = Topt(j)-BPEopt(j);

        elseif j==2

            Dopt(j) = (1/(hvap(Tvopt(j))-hliq(Topt(j))))*(Dopt(j-1)*hevap(Tvopt(j-
1))-(F/n)*C((Topt(j)+Talimentacion)/2,Xf)*(Topt(j)-Talimentacion)+Bopt(j-1)*C((Topt(j)
+Tvopt(j))/2,Xopt(j-1))*(Topt(j-1)-Topt(j)));
            Bopt(j) = (F/n) - Dopt(j) + Bopt(j-1);
            Qopt(j) = (Dopt(j-1)*hevap(Tvopt(j-1))-(F/n)*C((Topt(j)+Talimentacion)
/2,Xopt(j))*(Topt(j)-Talimentacion));
            SDopt = SDopt + Dopt(j);
            Xopt(j) = k*(F/n)*Xf/Bopt(j);
            BPEopt(j) = fBPE(Topt(j),Xopt(j)/1000);
            Uopt(j) = Qopt(j)/A_ef/BPE(j);
            Topt(j) = 0.185*Uopt(j)-390.815;
            Tvopt(j) = Topt(j)-BPEopt(j);

        elseif j == n

            Topt(j) = T(j);
            Tvopt(j) = Topt(j)-BPEopt(j);
            Dopt(j) = (1/(hvap(Tvopt(j)) - hliq(Topt(j))))*(Dopt(j-1)*hevap(Tvopt
(j-1)) + SDopt*(hliq(Tvopt(j-2)) - hliq(Tvopt(j-1))) - (F/n)*C((Topt(j)+Talimentacion)
/2,Xf)*(Topt(j)-Talimentacion) + Bopt(j-1)*C((Topt(j)+Tvopt(j))/2,Xopt(j-1))*(Topt(j-1)
-Topt(j)));
            Bopt(j) = (F/n) - Dopt(j) + Bopt(j-1);
            Qopt(j) = (Dopt(j-1)*hevap(Tvopt(j-1)) + SDopt*C(Tvopt(j),Xopt(j))*
(Tvopt(j-1)-Tvopt(j))-(j-1)*(F/n)*C((Topt(j)+Talimentacion)/2,Xopt(j))*(Topt(j)-
Talimentacion));
            SDopt = SDopt + Dopt(j);
            Xopt(j) = j*(F/n)*Xf/Bopt(j);
            BPEopt(j) = fBPE(Topt(j),Xopt(j)/1000);
            Uopt(j) = Qopt(j)/A_ef/BPE(j);
            Topt(j) = 0.185*Uopt(j)-390.815;
            Tvopt(j) = Topt(j)-BPEopt(j);

```

else

```
    Dopt(j) = (1/(hvap(Tvopt(j))-hliq(Topt(j))))*(Dopt(j-1)*hvap(Tvopt(j-1))-
    (F/n)*C((Topt(j)+Talimentacion)/2,Xf)*(Topt(j)-Talimentacion)+Bopt(j-1)*C((Topt(j)+
    Tvopt(j))/2,Xopt(j-1))*(Topt(j-1)-Topt(j)));
    Bopt(j) = (F/n) - Dopt(j) + Bopt(j-1);
    Qopt(j) = (Dopt(j-1)*hvap(Tvopt(j-1))-(F/n)*C((Topt(j)+Talimentacion)/2,Xopt(j))*
    (Topt(j)-Talimentacion));
    SDopt = SDopt + Dopt(j);
    Xopt(j) = j*(F/n)*Xf/Bopt(j);
    BPEopt(j) = fBPE(Topt(j),Xopt(j)/1000);
    Uopt(j) = Qopt(j)/Aef/BPE(j);
    Topt(j) = 0.185*Uopt(j)-390.815;
    Tvopt(j) = Topt(j)-BPEopt(j);
```

end

end

iteropt=iteropt+1;

end

```
function f = BPE(T,X)

    A = 0.2009 + 0.2867e-2*T + 0.002e-4*T^2;
    B = 0.0257 + 0.0193e-2*T + 0.0001e-4*T^2;

    f = A*(X/34.46) + B*(X/34.46)^2;

end
```



```
function f = C (T,X)
```

```
A = 4206.8 - 6.6197*X + 1.2288e-2*X^2;
```

```
B = -1.1263 + 5.4178e-2*X - 2.2717e-4*X^2;
```

```
C = 1.2026e-2-5.3566e-4*X + 1.8906e-6*X^2;
```

```
D = 6.8777e-7 + 1.517e-6*X - 4.4268e-9*X^2;
```

```
f = (A + B*T + C*T^2 + D*T^3)/1000;
```

```
end
```

```
function f = hevap(T)

    f = (2501.897149 - 2.407064037*T+1.192217e-3*T^2-1.5863e-5*T^3)*1000;

end
```

```
function f = hliq(T)
```

```
    f = (-0.033635409+4.20755011*T-6.200339e-4*T^2+4.459374e-6*T^3)*1000;
```

```
end
```

```
function f = hvap (T)
```

```
    f = (2501.689845 + 1.806916015*T+5.087717e-4*T^2-1.221e-5*T^3)*1000;
```

```
end
```

```
function f = U(X)
```

```
U = (1.9695 + 1.2057e-2*X - 8.5989e-5*X^2 + 2.5651e-7*X^3) * 1000;
```

```
end
```

```

%////INTERCAMBIADOR DE CALOR

clc
clear all

%Datos Intercambiador
Dext = 0.0254;
e = 0.0015;
Di = Dext-2*e;
Nt = 150;
Np = 2;
Pt = Dext*1.25;
Dcarcasa = 2*Pt*sqrt(Nt/pi);
Lb = 0.2;
Ss = Dcarcasa*(Pt-Dext)*Lb/Pt;
De = 4*((Pt^2)- pi*(Dext^2)/4)/(pi*Dext);
Te = 560;
Ts = 290;
te = 83.14;
tsat = 356.8;
ts = 535;
eficiencia = (Te-Ts)/(Te-te);

%Material tubos acero aleado niquel
kt = 21.4;

%Flujo interno //sal fundida

vi = 1;
Tpropiedades = (Te+Ts)/2;
rhoi = 2090 - 0.636*Tpropiedades;
Cpi = 1443 + 0.172*Tpropiedades;
viscosidadi = (22.714-.12*Tpropiedades+(2.281e-4)*(Tpropiedades^2)-(1.474e-7) ✓
*Tpropiedades^3)*1e-3;
ki = 0.443+(1.9e-4)*Tpropiedades;
Rei = rhoi*vi*Di/viscosidadi;
Qi = vi*pi/4*Di^2;
mi = rhoi*Qi;
Pri = viscosidadi*Cpi/ki;
Xcd = 10*Di;
%Petukov
f = (0.79*log(Rei)-1.64)^-2;
%Gnielinski
Nui = (f/8)*(Rei-1000)*Pri/(1+12.7*((f/8)^0.5)*((Pri^(2/3))-1));
hsal = Nui*ki/Di;

%Calor cedido por la sal
qi = mi*Nt/Np*Cpi*(Te-Ts);

%Flujo carcasa /// agua

Tcpvapor = [380; 400; 450; 500; 550; 600; 650; 700; 750; 800; 850];
Cpvapor = [2060; 2014; 1980; 1985; 1997; 2026; 2056; 2085; 2119; 2152; 2186];
Tcpagua = [273.15; 325; 373.15; 420; 430; 440; 450; 460; 470; 480; 490; 500; 510; 520; 530; ✓
570; 620; 645];

```

```

Cpagua = [4217;4182;4217;4302;4331;4360;4400;4440;4480;4530;4590;4660;4740;4840;✓
4950;5680;9350;361];
hcambiofase = 1319425;
Cpv = interp1(Tcpvapor,Cpvapor,((tsat+ts)/2)+273.15,'linear');
Cpa = interp1 (Tcpagua,Cpagua,((tsat+te)/2)+273.15,'linear');
mcarcasa = qi/(Cpa*(tsat-te)+hcambiofase+Cpv*(ts-tsat));
%Sacaremos la viscosidad del agua del valor medio
viscagua = 8.1e-5;
kc = 0.497;
Cpc = interp1 (Tcpagua,Cpagua,((te+ts)/2)+273.15,'linear');
Rec = mcarcasa*De/Ss/viscagua;
Prc = Cpc*viscagua/kc;
Nuc = 0.36*Rec^(0.55)*Prc^(1/3);
hw = Nuc*kc/Dext;

U = 1/((1/hw)+(Dext/(hsal*Di))+(Dext*log(Dext/Di)/(2*kt)));

Uevaporador = 1/((Dext/(hsal*Di))+(Dext*log(Dext/Di)/(2*kt)));

%Precalentador
qprecalentador = mcarcasa*Cpa*(tsat-te);
Tse = Ts + qprecalentador*Np/(mi*Nt*Cpi);
Fpre = 0;
Npre = 0;
Rpre = (te-ts)/(Ts-Tse);
Ppre = (Ts-Tse)/(te-Tse);
LMTDpre = (Tse-ts-Ts+te)/log((Tse-ts)/(Ts-te));

while Fpre<0.8

    Npre = Npre+1;
    alphapre = ((1-Rpre*Ppre)/(1-Ppre))^(1/Npre);
    Spre = (alphapre-1)/(alphapre-Rpre);
    Fpre = ((sqrt(Rpre^2+1)*log((1-Spre)/(1-Rpre*Spre)))/((Rpre-1)*log((2-Spre*(Rpre+1-✓
sqrt(Rpre^2+1)))/(2-Spre*(Rpre+1+sqrt(Rpre^2+1))))));

end

Aprecalentador = qprecalentador/(U*Fpre*LMTDpre);
Lprecalentador = Aprecalentador / (pi*Dext*Np*Nt);
Lcarcasapre = Lprecalentador/Npre;
Nbaflesp = ceil(Lcarcasapre/Lb);

%Evaporador
Fevap = 1;
qevaporador = mcarcasa * hcambiofase;
Tss = Tse+qevaporador*Np/(mi*Nt*Cpi);
LMTDevap = (Tss-ts-Tse+ts)/log((Tss-ts)/(Tse-ts));
Aevaporador = qevaporador/(Uevaporador*Fevap*LMTDevap);
Levaporador = Aevaporador / (pi*Dext*Np*Nt);
Lcarcasaev = Levaporador;
Nbaflese = ceil(Lcarcasaev/Lb);

%Sobrecalentador
qsobrecalentador = mcarcasa*Cpv*(ts-tsat);

```

```
Fsobre = 0;
Nsobre = 0;
Rsobre = (tsat-ts)/(Tss-Te);
Psobre = (Tss-Te)/(tsat-Te);
LMTDsobre = (Te-ts-Tss+tsat)/log((Te-ts)/(Tss-tsat));

while Fsobre<0.8

    Nsobre = Nsobre+1;
    alphasobre = ((1-Rsobre*Psobre)/(1-Psobre))^(1/Nsobre);
    Ssobre = (alphasobre-1)/(alphasobre-Rsobre);
    Fsobre = ((sqrt(Rsobre^2+1)*log((1-Ssobre)/(1-Rsobre*Ssobre)))/((Rsobre-1)*log((2-  
Ssobre*(Rsobre+1-sqrt(Rsobre^2+1)))/(2-Ssobre*(Rsobre+1+sqrt(Rsobre^2+1))))));

end

Asobrecaientador = qsobrecaientador/(U*Fsobre*LMTDsobre);
Lsobrecaientador = Asobrecaientador/(pi*Dext*Np*Nt);
Lcarcasasobre = Lsobrecaientador/Nsobre;
Nbafless = ceil(Lcarcasasobre/Lb);
%perdidas de carga
%delta_ps = f*rhoi*vi^2*L/(2*Di);
% fw = exp(0.576-0.19*log(Rec));
% delta_pw = fw*Ds*((mc/Ss)^2)*(L/Lb)/(2*

L = Lprecaientador+Lsobrecaientador+Levaporador;
```



```
%///CAMPO DE HELIOSTATOS///

clc
clear all
%Datos
htorre = 80;
We = 17e6;
Ah = 120;
%Helioestado cuadrado
ah = sqrt (Ah);
lh = ah;
wr = ah/lh;
%Radiación
Io = 713.83;
%Datos receptor (GEMASOLAR)
Dr = 8.1;
hr = 10.6;
%Reflectividad de los espejos
rho = 0.8883;
%Desviación estándar por la forma solar
sigmar = 0.00251;
ar = sqrt(Ah)/(2*sqrt(2)*sigmar);
%Rendimientos
Reflectancia = 0.9;
Desbordamiento = (ph(hr/(2*sqrt(2)*sigmar),ar,ar)*ph(Dr/(2*sqrt(2)*sigmar),ar,ar))/ (ar^2);
Sombrasybloqueos = 0.95;
rendimientorankine = 0.5;
rendalmacenamientotot = 0.99;
rendreceptor = 0.88; %Quick evaluation of the annual heliostat field efficiency
%Pérdidas receptor
sigma = 5.67e-8;
Atotal = pi*Dr*hr;
epsilon_aire = 0.8;
Taire = 30 + 273.15;
epsilon_tubos = 0.9;
dtubos = 0.035;
e = 0.0015;
dint = dtubos-2*e;
sep_tubos = 0.005;
B = (sep_tubos+dtubos)/dtubos;
Fgt = 1-(1/B)*(sqrt(B^2-1)-acos(1/B));
epsilon_eff = 1/((1/(Fgt*(2-Fgt))+B/pi*(1/epsilon_tubos-1)));
grc = Atotal/((1/epsilon_eff)+(1/epsilon_aire)-1);
T = 290 + 273.15;
ktubos = 25;
N_tubos = 80;
L_tubos = 84.8;
Tt = 600 + 273.15;
Tt_1 = 500 + 273.15;
Te = 290 + 273.15;
Ts = 560 + 273.15;

perdidas_rad = 1;
rendfp = 0.74;
```

```

rendperdidarad = 1;
rendfp = 0.74;

%//PRIMERA ITERACIÓN//
Atenuacion_atmosferica = 1;
factorcoseno = 1;

%Posición receptor
x0 = 0;
y0 = 0;
z0 = htorre + hr/2 - lh;

%Ángulos solares
latitud = 37.095736;
Ndia = 74;
AST = 12; %Hora //mediodía
w = 15*(AST-12);
d = asind (0.39795*cosd(0.98563*(Ndia-173)));
alpha = asind (sind(d)*sind(latitud)+cosd(d)*cosd(w)*cosd(latitud)); %Altitud solar
cenital = 90-alpha;
A = real(acosd ((sind(d)*cosd(latitud)-cosd(d)*cosd(w)*sind(latitud))/cosd(alpha)));

if w>0
    azimut = 360-A;
else
    azimut = A;
end

%Vector Observador-Sol
%S = [sind(alpha); cosd(alpha)*sind(A);cosd(alpha)*cosd(A)];
S = [cosd(alpha)*sind(A); cosd(alpha)*cosd(A);sind(alpha)];

%Número heliostatos
nmaxiter = 1000;
nh = zeros (1,nmaxiter);
iter = 1;
nhi = ✓
(We/Io/Ah/Reflectancia/Desbordamiento/Sombrasybloqueos/Atenuacion_atmosferica/factorcos ✓
eno/rendimientorankine/rendalmacenamientot/rendreceptor/rendperdidarad/rendfp);
nhi_1 = 0;
nh(1) = nhi;
NHI = zeros(1,100);
NHI_1 = zeros(1,100);
NHI(iter) = nhi;
NHI_1(iter) = nhi_1;
Qi = We;
v_sal = 1;
%m_sal = 200;
y = 1;

while nhi ~= nhi_1 && iter<10

```

```
nhi_1 = nhi;
nh(iter) = ceil(nhi);
radio = 0;
NHtotal = 0;
R = zeros (1,1000);
incR = zeros (1,1000);
NH = zeros (1,1000);
incL = zeros (1,1000);

while nh(iter) > NHtotal

    radio = radio + 1;

    if radio == 1

        R(radio) = htorre/2;
        incR(radio) = R(radio);
        NH(radio) = ceil(2*pi*R(radio)/(sqrt(Ah)*1.5));
        %incL(radio) = sqrt(Ah)*(1.25+radio/20);
        incL(radio) = 2*pi*R(radio)/NH(radio);
        NHtotal = NHtotal + NH(radio);

    else

        incR(radio) = sqrt(Ah)*(1.25+radio/20);
        R (radio) = R(radio-1)+incR(radio);
        NH(radio) = ceil(2*pi*R(radio)/(sqrt(Ah)*(1.5+radio/20)));
        %incL(radio) = sqrt(Ah)*(1.25+radio/20);
        incL(radio) = 2*pi*R(radio)/NH(radio);
        NHtotal = NHtotal+NH(radio);
    end

end

%Se le resta la diferencia
NH(radio) = NH(radio) - (NHtotal - nh(iter));

%Colocación heliostatos

i = 1;
matriz = zeros (nh(iter),6);
hel = 0;
k = 1;

for i = 1:1:radio

    j = 1;
```

```

for j = 1:1:NH(i)

    %Número heliostátos

    hel = hel + 1;
    matriz (k,1) = hel;
    matriz (k,2) = R(i);

    %Última fila

    if i == radio

        ultima_fila = floor(NH(i)/2);
        matriz (k,3) = (pi/2-ultima_fila*incL(i)/R(i)*180/pi) + (j-1)*incL(i)/R
(i)*180/pi;
        %matriz (k,3) = (-pi/2-ultima_fila*incL(i)/R(i)*180/pi) + (j-1)*incL(i)
/R(i)*180/pi;
        matriz (k,4) = R(i)*cosd(matriz(k,3));
        %matriz (k,5) = R(i)*sind(matriz(k,3));
        matriz (k,5) = -R(i)*sind(matriz(k,3));

    else

        matriz (k,3) = (pi/2 - (j-1)* incL(i)/R(i))*180/pi;
        %matriz (k,3) = (-pi/2 - (j-1)* incL(i)/R(i))*180/pi;
        matriz (k,4) = R(i)*cosd(matriz(k,3));
        %matriz (k,5) = R(i)*sind(matriz(k,3));
        matriz (k,5) = -R(i)*sind(matriz(k,3));

    end

    k = k + 1;

end

end

%Atenuación atmosférica
sum = 0;

for i = radio:-1:1

    S0 = (sqrt(z0^2 + R(radio)^2))/1000;
    f_at = (0.99326 - 0.1046*S0 + 0.017*S0^2-0.002845*S0^3)*NH(i);
    v_at(i) = f_at/NH(i);
    sum = sum + f_at;

end

Atenuacion_atmosferica = sum/nh(iter);

%Factor coseno
sum_cos = 0;

```

```

for i = 1:1:nh(iter)

    t = [x0-matriz(i,4),y0-matriz(i,5),z0];
    t = t./norm(t);
    matriz(i,6) = cosd(0.5*acosd(dot(t,S)));
    sum_cos = sum_cos + matriz(i,6);

end

factorcoseno = sum_cos/nh(iter);

iter = iter + 1;

Qi = We/rendimientorankine/rendalmacenamientot/rendreceptor/perdidas_rad/rendfp;

%TEMPERATURA EN LOS TUBOS

while Tt ~= Tt_1 %La iteración acabará cuando el valor de la temperatura sea el mismo en dos iteraciones consecutivas

    Tt_1 = Tt;
    Tpropiedades = (T + Tt)/2;
    rho_sal = 2090 - 0.636*(Tpropiedades-273.15);
    Cp_sal = 1443 + 0.172*(Tpropiedades-273.15);
    viscosidad_sal = (22.714-.12*(Tpropiedades-273.15)+(2.281e-4)*((Tpropiedades-273.15)^2)-(1.474e-7)*(Tpropiedades-273.15)^3)*1e-3;
    k_sal = 0.443+(1.9e-4)*(Tpropiedades-273.15);
    m_sal = rho_sal*v_sal*pi*dint^2/4;
    Re_sal = 4*m_sal/(pi*dint*viscosidad_sal*N_tubos);
    Pr_sal = viscosidad_sal*Cp_sal/k_sal;
    h_sal = 0.023*Re_sal^0.8*Pr_sal^0.4*k_sal/dint;
    Rt = 1/h_sal/pi/dint/N_tubos/L_tubos + log(dtubos/dint)/2/pi/ktubos/N_tubos/L_tubos;
    UA = 1/Rt;
    Tt = (Ts*exp(UA/m_sal/Cp_sal)-Te)/(exp(UA/m_sal/Cp_sal)-1);
    m_sal = (Qi-grc*sigma*(Tt^4-Taire^4))/(Cp_sal*(Ts-Te));
    Qrad = grc*sigma*(Tt^4-Taire^4);
    Tpropiedades = T;
    perdidas_rad = (Qi-Qrad)/Qi;

end

Qi = We/rendimientorankine/rendalmacenamientot/rendreceptor/perdidas_rad/rendfp;
nhi = (Qi/Io/Ah/Reflectancia/Desbordamiento/Sombrasybloqueos/Atenuacion_atmosferica/factorcoseno/rho);
nh(iter) = ceil(nhi);

NHI(iter) = nhi;
NHI_1(iter) = nhi_1;
end

%Eficiencia heliostatos

```

```

ef_hel = ✓
Atenuacion_atmosferica*Desbordamiento*factorcoseno*Reflectancia*Sombrasybloqueos;

niter = 1:1:iter;
Nhi = zeros(1,iter);
Nhi_1 = zeros(1,iter);

z=1;

for z = 1:length(niter)
    Nhi(z) = NHI(z);
    Nhi_1(z) = NHI_1(z);
end

%figure(1)
%hold on
%plot(niter,Nhi,'b')
%plot(niter,Nhi_1,'r')
%xlabel('Nº iteraciones')
%ylabel('Nº heliostatos')

z = 1;
a = 1;
b = 1;
coord_x = zeros(1,hel);
coord_y = zeros(1,hel);

for a = 1:1:radio
    z = 1;
    for z = 1:1:NH(a)

        coord_x(b) = matriz(b,4);
        coord_y(b) = matriz(b,5);
        fc(b) = matriz(b,6);
        rend(b) = v_at(a)*Desbordamiento*Reflectancia*Sombrasybloqueos*matriz(b,6);
        b = b+1;
    end
end

minfc = min(fc);
minr = min(rend);
maxr = max(rend);

%figure(2)
%plot (0,0,'ks');
%plot(coord_x,coord_y,'ok')
%xlabel ('Longitud [m] Este/Oeste')
%ylabel ('Longitud [m] Norte/Sur')

%z=1;

%for z=1:1:hel

%figure(3)
%hold on

```

```
%xlabel ('Longitud [m] Este/Oeste')
%ylabel ('Longitud [m] Norte/Sur')

%plot (0,0,'ks');
%if fc(z)>=0.95
%    plot(coord_x(z),coord_y(z),'og')
%elseif fc(z)>=0.9
%    plot(coord_x(z),coord_y(z),'oc')
%elseif fc(z)>=0.85
%    plot(coord_x(z),coord_y(z),'ob')
%elseif fc(z)>=0.8
%    plot(coord_x(z),coord_y(z),'ok')
%elseif fc(z)>=0.75
%    plot(coord_x(z),coord_y(z),'oy')
%elseif fc(z)>=0.7
%    plot(coord_x(z),coord_y(z),'om')
%elseif fc(z)>=0.65
%    plot(coord_x(z),coord_y(z),'or')
%elseif fc(z)>=0.6
%    plot(coord_x(z),coord_y(z),'og')
%elseif fc(z)>=0.55
%    plot(coord_x(z),coord_y(z),'oc')
%elseif fc(z)>=0.5
%    plot(coord_x(z),coord_y(z),'ob')
%elseif fc(z)>=0.45
%    plot(coord_x(z),coord_y(z),'ok')
%elseif fc(z)>=0.4
%    plot(coord_x(z),coord_y(z),'oy')
%elseif fc(z)>=0.35
%    plot(coord_x(z),coord_y(z),'om')
%elseif fc(z)>=0.3
%    plot(coord_x(z),coord_y(z),'or')
%end
%end

z = 1;

for z=1:1:hel

    figure(4)
    hold on
    xlabel ('Longitud [m] Este/Oeste')
    ylabel ('Longitud [m] Norte/Sur')

    plot (0,0,'ks');
    if rend(z)>=0.55
        plot(coord_x(z),coord_y(z),'og')

    elseif rend(z)>=0.5
        plot(coord_x(z),coord_y(z),'oc')
    elseif rend(z)>=0.45
        plot(coord_x(z),coord_y(z),'ob')
    elseif rend(z)>=0.4
        plot(coord_x(z),coord_y(z),'ok')
```

```
elseif rend(z)>=0.35
    plot(coord_x(z),coord_y(z),'oy')
elseif rend(z)>=0.3
    plot(coord_x(z),coord_y(z),'om')
elseif rend(z)>=0.25
    plot(coord_x(z),coord_y(z),'or')

end
end
```



```
function f = ph (X1,Y1,Y2)
```

```
f = 0.5*((X1+Y1)*erf(X1+Y1) + (1/sqrt(pi))*exp(-(X1+Y1)^2)-(X1-Y2)*erf(X1-Y2)-(1/sqrt(pi))*exp(-(X1-Y2)^2));
```

```
end
```